



Työterveyslaitos

Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

ÄKK Loppuraportti

RAKENNUSTEN ÄÄNIOLOSUHTEIDEN KÄYTTÄJÄLÄHTÖINEN
KEHITTÄMINEN

**Valtteri Hongisto ja Mikko Kylliäinen
2015**

ÄKK loppuraportti

Rakennusten ääniolosuhteiden käyttäjälähtöinen kehittäminen



Valtteri Hongisto ja Mikko Kylliäinen
2015

Työterveyslaitos
Sisäympäristölaboratorio
Lemminkäisenkatu 14-18 B
20520 Turku
www.ttl.fi

Kansi: Mainostoimisto Albert Hall Finland Oy Ltd

© 2015 Työterveyslaitos, Mikko Kylliäinen ja Valtteri Hongisto

Tämän teoksen osittainenkin kopiointi on tekijänoikeuslain (404/61, siihen myöhemmin tehtyine muutoksineen) mukaisesti kielletty ilman asianmukaista lupaa.

ISBN 978-952-261-581-7 (nid.)
ISBN 978-952-261-580-0 (pdf)

TIIVISTELMÄ

Julkaisun viittaus: Hongisto V, Kylliäinen M, ÄKK loppuraportti, Työterveyslaitos, Helsinki, 2015.

ISBN-numerot: ISBN 978-952-261-581-7 (nid.), ISBN 978-952-261-580-0 (pdf)

Tavoite. Standardeissa ISO 717-1 ja ISO 717-2 määritellään yksiarvoiset mittaluvut, jotka lasketaan ilma- ja askelääneneristävyyden mittaustuloksista eri taajuuksilla. Näitä mittalukuja soveltaen rakentamismääräyksissä ja ohjeissa esitetään ääneneristävyydelle asetetut vaatimukset ja suositukset. Standardin kuvaamien mittalukujen muutoksiin kohdistui kansainvälisesti voimakkaita paineita 2010-luvun alussa. Tämän hankkeen päätaavoitteena oli selvittää tieteellisin tutkimusmenetelmin, mitkä ääneneristävyyden objektiiviset mittaluvut ovat parhaiten yhteydessä ihmisten kokemukseen ääneneristyksestä. Toisena tavoitteena oli määrittää nykyisten mittausmenetelmien ja mittalukujen mittausepävarmuudet. Kolmantena tavoitteena oli selvittää ääneneristystyytyväisyyttä erityyppisissä asuinkerrostaloissa. Edellisten lisäksi tavoitteena oli vastata useisiin spesifeihin tutkimuskysymyksiin liittyen mm. ääneneristysvaatimuksiin toimistohuoneissa, melun univaikutuksiin ja miellyttävään taustamelun spektriin.

Aineistot ja menetelmät. Hanke oli monitieteinen koostuen rakennusakustiikan, psykoakustiikan, rakennustekniikan, ympäristöpsykologian ja kognitiivisen psykologian tutkijoista ja asiantuntijoista. Hankkeessa toteutettiin neljä psykoakustista kuuntelukoetta (150 koehenkilöä), ääneneristystä koskeva kyselytutkimus kerrostaloissa (594 vastaajaa), lukuisia ääneneristävyyden mittauksia välipohjille ja väliseinille sekä laboratoriossa että kentällä, yksi kognitiivisen psykologian laboratoriotutkimus (36 koehenkilöä) ja ensimmäinen ympäristömelua koskeva suomalainen unitutkimus (21 koehenkilöä).

Päätulokset. Hanke toteutettiin 13 työpaketissa. Kunkin työpaketin päätulokset sekä lähdeartikkelit on tiivistetty tähän raporttiin. Hankkeessa tuotettiin 53 julkaisua, joista yhdeksän on julkaistu vertaisarvioituissa kansainvälisissä tieteellisissä lehdissä.

Johtopäätökset. Hankkeessa luotiin vankat tieteelliset perustelut sille, mitä ilma- ja askelääneneristävyyden mittalukuja ja taajuusalueita Suomessa kannattaisi käyttää tulevaisuudessa. Näyttö perustuu psykoakustisiin tutkimuksiin ja mittausepävarmuustarkasteluihin. Asuinhuoneistojen ääneneristysvaatimuksia ei tarvitse kasvattaa nykyisestään. Toimistohuoneiden välisen ilmaääneneristävyyden ohjearvoja tulisi kasvattaa 5 dB. Vanhoissa kerrostaloissa tulisi julkisivu- ja ikkunaremonttien yhteydessä kiinnittää huomiota ääneneristykseen, koska vanhoissa kerrostaloissa havaittiin voimakkaan ympäristömelun alueilla tavanomaista enemmän melun häiritsevyyttä. Ulkovaipan ääneneristyksen suunnittelun ja toteutuksen yhteydessä tulisi unenlaadun kannalta kiinnittää huomiota ensisijaisesti ääneneristävyyteen suurilla taajuuksilla.

Rahoittajat. Tämä loppuraportti koskee Tekes-rahoitteista julkista tutkimushanketta ”Rakennusten ääniolosuhteiden käyttäjälähtöinen kehittäminen - ÄKK”, jonka toteuttivat rinnakkaishankkeena kolme tutkimuslaitosta vuosina 2011-2014. Rahoituspäätökset olivat 40412/11 (Työterveyslaitos), 40413/11 (TTY-säätiö/Tampereen teknillinen yliopisto) ja 40414 (Turun yliopisto). Hanketta rahoittivat Tekesin ja tutkimuslaitosten lisäksi yritykset, jotka on mainittu liitteessä 2.

SISÄLLYSLUETTELO

1 Tausta ja tavoitteet	7
2 Toteutus, aineistot ja menetelmät	9
3 Tulokset	11
3.1 Päätulokset ja keskeiset läpimurrot	11
3.2 Tieteelliset julkaisut	12
3.3 Verkostoituminen ja vaikuttavuus	12
4 Tulostiivistelmät työpaketeittain	15
4.1 Suomalaisen rakennuskannan ääneneristävyys	15
4.2 Ääneneristävyyden mittalukujen standardisointi	16
4.3 Askelääneneristävyysmittausten epävarmuus	17
4.4 Ilmaääneneristävyysmittausten epävarmuus	18
4.5 Väliseinätyypin vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen	19
4.6 Betonirakenteen paksuuden vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen	20
4.7 Julkisivurakenteen ääneneristävyyden vaikutus tiemelun häiritsevyyteen	21
4.8 Ilmanvaihtomelun taajuusjakauma ja häiritsevyys	22
4.9 Ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku	23
4.10 Askelääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku	24
4.11 Julkisivun ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku	25
4.12 Toimistohuoneiden ääneneristys ja työtehokkuus	26
4.13 Tieliikennemelun taajuusjakauman vaikutus uneen	27
5 Jatkotutkimustarpeet	29
6 Suositukset määräyksiä ja ohjeita koskien	31
LIITE 1. Hankkeen tuottamat julkaisut	33
Vertaisarvioidut tieteelliset julkaisut (9 kpl)	33
Ulkomaiset kongressijulkaisut (13 kpl)	33
Suomalaiset seminaarijulkaisut (24 kpl)	34
Tieteelliset raportit (2 kpl)	35
Opinnäytetyöt (4 kpl)	35
Valmisteilla olevat käsikirjoitukset	35
LIITE 2: Tutkimuksen johto ja toteuttajat	37

1 TAUSTA JA TAVOITTEET

Ääneneristyksellä tarkoitetaan tässä hankkeessa kolmea asiaa:

- huoneiden välistä ilmaääneneristävyyttä,
- huoneiden välistä askelääneneristävyyttä sekä
- julkisivurakenteen ilmaääneneristävyyttä.

Kutakin suuretta mitataan ISO-standardien mukaisesti yleensä taajuuksilla 100–3150 Hz tai 50–5000 Hz. Laboratoriossa mittaukset tehdään eri standardein kuin rakennuksessa.

Standardi ISO 717-1 määrittää ilmaääneneristävyyden ja standardi ISO 717-2 askelääneneristävyyden yksiarvoiset mittaluvut (myöh. mittaluvut). Mittalukuun sisältyvät eri taajuuksien ääneneristävyyden arvot tavalla, joka ottaa jossain määrin huomioon kuuloaistin ominaisuuksia sekä tyypillisten melulähteiden spektrejä ja ta-soja. Tämä hanke keskittyy siihen, ovatko nykyisin käytettävät mittaluvut tarkoituksenmukaisia tai pitääkö niitä muuttaa.

Vuosi 2010 oli kansainvälisesti merkittävä vuosi rakennusakustiikan standardisoinnin ja tutkimuksen kannalta, koska silloin aloitettiin eurooppalainen COST TU0901 -verkostohanke, joka kesti vuoteen 2014. Hankkeen kolmannesvuosittain pidettyihin kokouksiin osallistui yli 100 asiantuntijaa ja tutkijaa eri maista. Hankkeen tavoitteena oli laatia eri maiden yhteistyönä harmonisoitu ehdotus siitä, mitä ääneneristävyyden mittalukuja eurooppalaiset maat voisivat tulevaisuudessa käyttää kansallisissa ohjeistuksissaan ja ehdottaa, minkälaisia tavoite-tasoja tai luokituksia näille mittaluvuille voisi asettaa.

Melko pian verkostohankkeen alettua ISO TC43/SC2/WG18 päätti aloittaa *ad hoc* -työryhmän, joka valmistelisi standardiehdotusluonnoksen ISO 16717-1. Sen tarkoituksena olisi korvata standardi ISO 717-1. ISO 717-1 määrittelee tällä hetkellä käytettävät ilmaääneneristävyyden mittaluvut, kuten ilmaääneneristysluvun R_w , jota suomalaisissa rakentamismääräyksissä käytetään.

ÄKK-hanke pyrki vastaamaan mahdollisimman hyvin näiden kahden kansainvälisen taustaprojektin asettamiin tieteellisiin kysymyksiin niillä resursseilla, joita ryhmällä oli käytettävissä.

Hankkeen päätavoitteena oli osoittaa, mitkä ääneneristävyyden objektiiviset mittaluvut ovat parhaiten yhteydessä ihmisten kokemukseen ääneneristyksestä. Hankkeen taustalla pyrittiin tuottamaan tieteellistä tietoa Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C1: 1998 uudistamista varten. Tämä raportti tiivistää keskeisim-mät uudistamistyöhön vaikuttavat tulokset.

Hanke keskittyi ensisijaisesti siihen, mitä mittalukuja tulisi käyttää, kun ääneneristävyyttä mitataan. Hanke ei ota voimakkaasti kantaa siihen, mitä tavoitearvoja mittaluvuille tulisi soveltaa, koska yksikäsitteistä vastausta tähän ei ole ja ohjearvoissa on otettava huomioon myös teknisiä, taloudellisia ja poliittisia näkökohtia. Tuloksia voi kuitenkin hyödyntää tavoitearvojen kehittämisessä.

COST TU0901: Integrating and Harmonizing Sound Insulation Aspects in Sustainable Urban Housing Constructions. Internet: <http://www.costtu0901.eu/>. Loppuraportti: <http://www.costtu0901.eu/tu0901-e-books.html>.

ISO TC43/SC2/WG18 ISO TC43/SC2 vastaa rakennusakustiikan standardisoinnista. WG 18 vastaa ilma- ja askelääneneristävyyden mittausta ja mittalukuja koskevien standardien kehittämisestä. (TC Technical Committee, SC Sub-committee, WG Working Group). Suomi on ISO:n jäsen-valtio. Suomen äänestykset tapahtuvat Metsta ry:n kautta.

2 TOTEUTUS, AINEISTOT JA MENETELMÄT

Hankkeen toteuttivat Työterveyslaitos, Tampereen teknillinen yliopisto ja Turun yliopisto. Hankkeen rahoittivat Tekes, ympäristöministeriö ja kahdeksan rakennusalan yritystä ja järjestöä (Liite 2).

Tässä raportissa kuvataan 13 osatutkimuksen (työpaketin) tulokset:

1. Suomalaisen rakennuskannan ääneneristävyys
2. Ääneneristävyyden mittalukujen standardisointi
3. Askelääneneristävyyssmittausten epävarmuus
4. Ilmaääneneristävyyssmittausten epävarmuus
5. Väliseinätyypin vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen
6. Betonirakenteen paksuuden vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen
7. Julkisivurakenteen ääneneristävyyden vaikutus tiemelun häiritsevyyteen
8. Ilmanvaihtomelun taajuusjakauma ja häiritsevyys
9. Ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku
10. Askelääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku
11. Julkisivun ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku
12. Toimistohuoneiden ääneneristävyys ja työtehokkuus
13. Tieliikennemelun taajuusjakauman vaikutus uneen

Hanke oli poikkitieteellinen käsittäen tutkijoita rakennustekniikan, rakennusakustiikan, psykoakustiikan, ympäristöpsykologian ja kognitiivisen psykologian aloilta. Aineistoja kerättiin kansainvälisesti katsoen erittäin monipuolisesti sekä kentältä että laboratorioista.

Hankkeeseen osallistuneet tutkijat on lueteltu Liitteessä 2. Kussakin työpaketissa toimi erilainen tutkijoiden ryhmä.

Seuraavassa esitetään kooste keskeisimmistä hankkeen aikana kerätyistä tai hankkeen hyödyntämistä aineistoista. Lisäksi selostetaan, missä työpaketeissa kutakin aineistoa hyödynnettiin, koska osa aineistoista palveli useampaa työpakettia.

- A. Eri puolilla Suomea olevissa asuinrakennuksissa tehdyt ilma- ja askelääneneristävyyssmittaukset, jälkikäynti-ajan mittaukset ja taustäänitason mittaukset (yhteensä 1386 kpl). Mittaukset on tehty pääosin asuin kerrostaloissa ja rivitaloissa.
 - o Hyödynnettiin työpaketeissa 1-3.
- B. Vuonna 2001 toteutetun kansainvälisen Nordtest-vertailutestin tulokset.
 - o Hyödynnettiin työpaketissa 4.
- C. Ilmaääneneristävyyden laboratoriomittauksia noin 100 erityyppisille rakenteelle Työterveyslaitoksen Turun akkreditoidussa testilaboratoriossa.
 - o Hyödynnettiin työpaketeissa 9, 11, 12 ja 13.
- D. Tieliikennemelun nauhoituksia erilaisten väylien varrella.
 - o Hyödynnettiin työpaketeissa 11 ja 13.
- E. Upofloor Oy:n askelääneneristävyyden testilaboratoriossa Nokialla määritettiin 9 erilaisen lattiapäällysteen ja kelluvan lattian askeläänitasot sekä askeläänikoneella että erilaisin ihmisperäisin askeläniherättein.
 - o Hyödynnettiin työpaketeissa 3 ja 10.
- F. Eri melualueille sijoittuvissa ja rakennustavoiltaan erilaisissa asuin kerrostaloissa Turussa tehtiin ääneneristystyvyä koskeva 7-sivuinen kyselytutkimus asukkaille. Kyselyyn vastasi 594 asukasta 28 talosta. Vastausaste oli yli 60 %. Osassa rakennuksista tehtiin myös ilma- ja askelääneneristävyyssmittaukset.
 - o Hyödynnettiin työpaketeissa 5-7 ja lisätietona työpaketeissa 4, 9 ja 10.

- G. Turussa toteutettiin 4 psykoakustista laboratoriokoetta rakenteiden ääneneristysten kokemiseen liittyen. Kokeisiin osallistui yhteensä yli 150 koehenkilöä.
 - o Työpakettit 8-11.
- H. Kognitiivisen psykologian laboratoriossa Turussa tutkittiin 32 koehenkilön avulla, miten työtehokkuus ja ääniympäristötyytyväisyys riippuvat toimistohuoneiden välisestä ääneneristyksestä.
 - o Työpaketti 12
- I. Helsingin unilaboratoriossa tutkittiin 21 koehenkilön voimin sitä, miten tieliikennemelun taajuusjakauma (kaksi ääneneristävyydeltään erilaista julkisivurakennetta) vaikuttaa unen laatuun, kun A-äänitaso on sama.
 - o Työpaketti 13.

3 TULOKSET

3.1 Päätulokset ja keskeiset läpimurrot

Työpakettien tulokset on tiivistetty luvussa 4. Seuraavaan on valittu 8 päätulosta. Ne on valittu sillä perusteella, että tulos on julkaistu ja ainakin yksi ao. kriteereistä täyttyy.

- Tuloksilla arvioidaan olevan vaikutusta kansallisiin määräyksiin, ohjeisiin tai suosituksiin.
- Tuloksella arvioidaan olevan suuri vaikutus tiedeyhteisöihin ja siellä tehtäviin jatkotutkimuksiin.
- Tuloksella arvioidaan olevan vaikutusta kansainväliseen standardisointiin.

Päätulokset ovat seuraavat:

1. Vuosina 2011–2014 käytiin poikkeuksellisen tiivistä kansainvälistä keskustelua standardiluonnoksesta ISO DIS 16717-1. Se oli suunniteltu korvaamaan standardi ISO 717-1, joka määrittelee ilmaääneneristävyyden mittaluvut. Nykyisin useimmissa maissa on käytössä mittaluku R_w , joka ottaa huomioon taajuusalueen 100–3150 Hz. Kansainvälinen debatti koski sitä, että standardiluonnos sisälsi vain yhden mittaluvun, R_{living} (vastaa lukua $R_w + C_{50-5000}$), joka perustuu taajuusalueeseen 50–5000 Hz. Tälle kehitykselle ei ollut riittäviä tieteellisiä perusteita. Työpaketissa 9 osoitettiin psykoakustisen koehenkilötutkimuksen keinoin, että ilmaääneneristävyyden mittaluvun ei ole tarpeellista sisältää taajuusaluetta 50–80 Hz. Tulosta tukivat työpaketin 4 epävarmuustarkastelut ja työpaketin 5 kyselytutkimukset kerrostaloissa. Tieto vietiin standardia ISO DIS 16717-1 valmistelevalle työryhmälle tietoon. Mm. ÄKK-hankkeen tutkimuksiin perustuen moni ISO:n jäsenvaltio esitti argumentteja standardiluonnosta ISO DIS 16717-1 vastaan. Työryhmän työskentely keskeytettiin toukokuussa 2014 liian voimakkaan vastustuksen vuoksi [5]. Tutkimuksen vaikuttavuus oli suuri oikean ajoituksen ja COST-hankkeen mahdollistaman kansainvälisen verkostoitumisen vuoksi.
2. Edelliseen liittyen standardiluonnos ISO CD 16717-2 oli suunniteltu korvaamaan standardi ISO 717-2, joka määrittelee puolestaan askelääneneristävyyden mittaluvut. Nykyisin useimmissa maissa on käytössä mittaluku $L'_{n,w}$, joka ottaa huomioon taajuusalueen 100–3150 Hz. Kansainvälinen debatti koski sitä, että standardiluonnos sisälsi vain yhden mittaluvun, R_{impact} (vastaa lukua $L_{n,w} + C_{1,50-2500}$), joka perustuu taajuusalueeseen 50–2500 Hz. Tälle kehitykselle haluttiin parempia tieteellisiä perusteita. Työpaketin 10 psykoakustiset koehenkilötutkimukset tukivat taajuusalueen 50–2500 Hz valintaa. Samalla kuitenkin kävi selväksi se, että mikään nykyisistä ISO 717-2 mittaluvuista ei selitä hyvin häiritsevyyttä, joka aiheutuu kävelystä sukin. Työpaketin 3 tutkimustulokset mittausepävarmuudesta osoittavat, että laajempi taajuusalue ei tuota mittausepävarmuuden kasvua. Tulokset viedään standardisointielinten tietoon, kun ne on julkaistu ulkomaisessa tiedelehdessä.
3. Työpaketin 11 kuuntelukokeessa selvitettiin, mitkä standardin ISO 717-1 mukaisista ilmaääneneristävyyden mittaluvuista selittävät parhaiten tiemelusta koettua häiritsevyyttä sisätiloissa. Tulokset eivät anna tukea sille, että siirryttäisiin käyttämään mittalukua $R_w + C_{tr,50-3150}$ nykyisen mittaluvun $R_w + C_{tr}$ sijasta. Jos julkisivurakenteiden ääneneristävyyden mitoitus halutaan järkipäisemmäksi, olisi perusteltua siirtyä käyttämään mittalukua R_w nopeiden väylien varrella, jossa rengasmelu dominoi. Hitaan ja raskaita ajoneuvoja sisältävän tieliikenteen kohdalla standardin ISO 717-1 mukainen tieliikennemelun referenssispektri on edustava ja $R_w + C_{tr}$:n käyttö on edelleen perusteltua. Jos melun spektrit ovat mittausnäyttöön perustuen tavanomaisesta poikkeavia, tulisi voida soveltaa tapauskohtaisia referenssispektrejä, ja taajuuspohjaista laskentaa, jolloin sekä melun että julkisivun ääneneristävyyden spektrit tulisivat otetuiksi oikein huomioon.
4. Työpaketin 2 laskennallisilla, kenttämittauksiin perustuvilla tarkasteluilla osoitettiin, että rakennuksessa mitattu ilmaääneneristysluku R_w selittää asumismelusta viereiseen huoneistoon aiheutuvaa äänitasoa heikommin kuin standardisoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$. Tulosten johdosta Suomessakin on tieteelliseltä kannalta perusteltua harkita siirtymistä siihen, että asuinhuoneistojen välinen ilmaääneneristävyyksivaatimus esitettäisiin standardisoituna äänitasoerolukuna. Tulokset viedään Suomen rakentamismääräyskokoelman uusimisesta vastaavan työryhmän tietoon.

5. Työpaketin 12 koehenkilötutkimuksessa voitiin osoittaa, että nykyiset toimistohuoneiden ääneneristys-suositukset eivät ole riittävät työtehon ja keskittymiskyvyn kannalta. Ilmaääneneristysluvun R_w tulisi olla vähintään 40 dB nykyisen 35 dB sijaan. Tulokset viedään Suomen rakentamismääräyskoelman uusimisesta vastaavan työryhmän tietoon.
6. Työpaketin 5 kyselytutkimuksilla osoitettiin, että asukkaat olivat yhtä tyytyväisiä ääneneristykseen riippumatta siitä, oliko huoneistojen välillä levyrakenneseinä vai betoniseinä. Tuloksella on luultavasti vaikutusta ääntä eristävien rakenteiden valintaan.
7. Työpaketin 6 kyselytutkimuksilla osoitettiin, että asukkaat olivat yhtä tyytyväisiä ääneneristykseen 1950-luvun ja 2000-luvun betonikerrostaloissa, vaikka rakennepaksuudet ja ääneneristystasot poikkesivat toisistaan merkittävästi. Tämän perusteella rakentamismääräyksissä vaadittavaa ääneneristystasoa ei näyttäisi olevan tarpeen kasvattaa. Tulokset viedään Suomen rakentamismääräyskokoelman uusimisesta vastaavan työryhmän tietoon.
8. Työpaketin 7 kyselytutkimuksilla selvitettiin asukkaiden kokemuksia tieliikennemelun häiritsevyydestä kerrostaloissa, jotka sijaitsivat vilkkaasti liikennöityjen teiden varsilla. Tieliikennemelun haittavaikutukset (häiritsevyys, unihaitat) olivat suurempia 1950-luvun kerrostaloissa kuin 2000-luvun kerrostaloissa. Tuloksen syy lieenee julkisivun ääneneristyskyvyssä, joka oli mittausten mukaan vanhoissa kerrostaloissa merkittävästi heikompi kuin uusissa. Vanhojen kerrostalojen julkisivukorjausten yhteydessä kannattaisi painottaa ääneneristyksen parannusta energiatehokkuuden rinnalla, koska melutasoa vähentämällä voidaan pienentää melun haittoja. Tulokset viedään Suomen rakentamismääräyskokoelman uusimisesta vastaavan työryhmän tietoon.

3.2 Tieteelliset julkaisut

Hanke on tähän mennessä (21.10.2015) tuottanut 53 tieteellistä julkaisua:

- 9 vertaisarvioitua tieteellistä julkaisua [1-9]
- 13 ulkomaista kongressijulkaisua [10-22]
- 25 kotimaista seminaarijulkaisua [23-47]
- 2 tieteellistä raporttia [48-49]
- 4 opinnäytetyötä [50-53]
- 6 valmisteilla olevaa käsikirjoitusta

Julkaisujen viittaustiedot on esitetty Liitteessä 1. Siellä esitetään myös internet-linkki, josta löytyvät linkit julkaisuihin. Julkaisutoiminta jatkuu arviolta vuoteen 2017 asti. Aineistoja ja artikkeleita on tarkoitus hyödyntää ainakin yhdessä väitöskirjatutkimuksessa.

3.3 Verkostoituminen ja vaikuttavuus

Hankkeen tärkeimmät osatulokset ovat jo vaikuttaneet ulkomaisten tutkimusryhmien tutkimusaiheisiin, kansainväliseen ISO- ja CEN-standardointiin ja eurooppalaisen verkostohankkeen COST TU 0901 tuloksiin.

Alle on koottu tapahtumat ja esitelmät, joissa osatuloja on viestitetty:

- o 12 kutsuttua esitelmää 5 ulkomaisessa kongressissa (näitä vastaavat julkaisut Liitteessä 1)
 - o Forum Acusticum 2014 Krakova
 - o Internoise 2013 Innsbruck
 - o Baltic-Nordic Acoustic Meeting 2012 Odense
 - o Eurnoise 2012 Praha
 - o Forum Acusticum 2011 Tanska
- o 24 esitelmää 5 kotimaisessa seminaarissa (näitä vastaavat julkaisut Liitteessä 1):
 - o Akustiikkapäivät 2013 (Turku) ja 2015 (Kuopio)
 - o Rakennusfysiikka 2013 ja 2015 (Tampere)
 - o Sisäilmastoseminaari 2014 (Helsinki)
- o Ei-julkaistu esitelmä
 - o erään rakennusalan yrityksen vuosiseminaarissa ulkomailla 2014.
 - o erään rakennusalan yrityksen koulutuspäivänä Suomessa 2014.
 - o erään rakennustuoteteollisuusyrityksen koulutuspäivänä Suomessa 2013.
 - o erään rakennusalan järjestön vuosikokouksessa Suomessa 2013.

- o Esitelmä ISO TC 43 SC 2 WG 18 PG10/11 kokouksessa Oslissa lokakuussa 2012.
- o Useita esitelmiä verkostohankkeen COST TU0901 kokouksissa vuonna 2013.
- o Esitelmä CEN 126 -kokouksessa Kööpenhaminassa 12/2013.
- o Esitelmä eurooppalaisen *Acouwood* –projektin tutkijakokouksessa 9/2012
- o Esitelmä eurooppalaisen *Silent Timber Build* –hankkeen aloitusseminaarissa Tukholmassa 4/2015.
- o Esitelmä kahdelle Turun kaupungin lautakunnalle keväällä 2015.
- o Viisi esitelmää loppuseminaarissa 27.10.2015 Helsingissä.

Lisäksi ÄKK-hankkeeseen on viitattu seuraavissa kansainvälisissä dokumenteissa:

- o ÄKK-hankkeen tutkimukset on mainittu useissa COST TU0901 loppuraportin kohdissa (COST TU0901 e-book Volume 1)
- o ÄKK-hankkeen tutkimuksiin viitattiin useiden maiden kommentaareissa koskien äänestystä standardiluonnosehdotuksesta ISO CD 16717-1 keväällä 2014.

Tuloksia on tarkoitus hyödyntää, kun Suomen rakentamismääräyskokoelman ääneneristystä ja meluntorjuntaa koskeva osa C1 uudistetaan. Uudistustyötä käsitellään ÄKK-loppuseminaarissa 27.10.2015 yhteydessä.

4 TULOSTII VISTELMÄT TYÖPAKETEITTAIN

4.1 Suomalaisen rakennuskannan ääneneristävyys

Tausta. Uusien asuinrakennusten ääneneristävyyttä on Suomessa tutkittu 1950-luvulta alkaen. Useimmat julkiset tutkimushankkeet, joissa on esitetty mittaustuloksia ääneneristävyydestä, ovat liittyneet rakentamismääräysten kehittämiseen. Ensimmäiset suositukset asuinhuoneistojen välisestä ääneneristävyydestä antoi VTT vuonna 1955. Vuonna 1960 julkaistiin ehdotus ääneneristysmääräyksiksi. Vuonna 1967 Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry julkaisi ääneneristysnormit, joiden sisältö siirtyi lähes sellaisenaan Suomen rakentamismääräyskokoelman osaksi C1 vuonna 1975. Ääneneristysmääräyksiä uudistettiin vuosina 1985 ja 1998. Ne ovat johtaneet rakenteiden muutoksiin. Eri vuosikymmeninä on myös tehty kyselytutkimuksia asukkaiden tyytyväisyydestä ääneneristävyyteen.

Tavoite. Tutkimuksen tavoitteena oli saada tietoa asuinhuoneistojen välisen ilma- ja askelääneneristävyyden kehittymisestä, asukastytyväisyyden kehityksestä sekä rakennepaksuuksien muutoksista Suomessa 1950-luvulta nykyhetkeen. Lisäksi selvitettiin, kuinka suuri osa mittaustuloksista täytti kunkin aikakauden vaatimukset.

Menetelmät. Julkisista tutkimusraporteista kerättiin tietoa asuinhuoneistojen välillä tehtyjen ilma- ja askelääneneristävyysmittausten tuloksista. Eri aikoina tehdyt mittaukset kuvaavat juuri tuona ajankohtana valmistuneen rakennuskannan ääneneristävyyttä. Mittausmenetelmä on periaatteiltaan säilynyt samanlaisena 1950-luvulta saakka, mutta mittalukujen määritelmät ovat muuttuneet. Eri aikakausina tehtyjen mittausten tulokset muunnettiin vastaamaan nykyistä ilmaääneneristävyyden mittalukua R_w ja askelääneneristävyyden mittalukua $L'_{n,w}$. Tutkimusaineistossa ei otettu huomioon ÄKK-hankkeen kyselytutkimustuloksia, koska niitä ei ollut vielä julkaistu aineistojen keruuvaiheessa.

Tulokset. Ilmaääneneristävyyttä koskevat vaatimukset ovat kiristyneet 4 dB verrattuna vuoden 1955 suosituksiin. Askelääneneristävyyttä koskevat vaatimukset ovat kiristyneet 9 dB. Betonirakenteisten asuinkeuhkalojen väliseinien paksuus on vastaavana aikana kasvanut noin 20–40 mm ja välipohjien pintamassa on kasvanut arvosta 380 kg/m² arvoon 510...750 kg/m². Toteutunut ilmaääneneristysluvun keskiarvo asuinhuoneistojen välillä sekä pysty- että vaakasuuntaan oli alimmillaan 1960-luvulla, noin 52 dB. Nykyisin keskiarvo on 57 dB. Askeläänitasoluvun keskiarvo on 1950-luvun keskiarvosta 57 dB parantunut keskiarvoon 49 dB. Vaatimukset täyttävien tulosten määrä on nykyisin 90 ja 100 % välillä, mutta alimmillaan tämä osuus oli askelääneneristävyyden osalta vuosina 1967–1976 (45 %) ja ilmaääneneristävyyden osalta 1960-luvulla ja 1970-luvun alussa 47–64 %. 1950-luvun asuinkeuhkalojen toteutunut akustinen laatu on ollut Suomessa Euroopan korkeimmalla tasolla 1950-luvulta lähtien ja on sitä edelleen. Säästöjen muutokset ovat nostaneet toteutunutta ääneneristävyyttä kahdella tavalla: määräyksissä vaaditut arvot nousivat ja vähitellen myös rakennus- ja suunnitteluvirheiden määrä väheni. Tämä näkyy mittaustuloksissa eri rakennusten välisten mittaustulosten eron keskihajonnan pienenemisenä. Molemmat seikat ovat vaikuttaneet asukastytyväisyyden paranemiseen: tyytyväisyysaste on kasvanut 1960-luvun 60 %:sta nykyiseen yli 90 %:iin.

Johtopäätökset. Tyytyväisyys ääneneristykseen on uusissa rakennuksissa verrattain korkea. Tämän perusteella ei olisi tarpeita kasvattaa ääneneristysvaatimuksia nykytasosta.

Julkaisuja. Lietzén & Kylliäinen 2013 Tekniikan Waiheita [8] ja Akustiikkapäivät [42].

Taulukko. Mitatun askeläänitasoluvun $L'_{n,w}$ ja suurimman sallitun arvon kehitys vuosina 1955–2008.

Aikakausi	Keskiarvo [dB]	Keskihajonta [dB]	Sallittu arvo [dB]	Sallittujen tulosten osuus [%]
1955–1959	57,1	4,7	62	86
1960–1967	55,0	4,3	56	65
1967–1976	57,5	6,1	58	46
1976–1999	55,4	3,7	58	85
2000–2008	48,8	3,9	53	93

4.2 Ääneneristävyyden mittalukujen standardisointi

Tausta. Suomessa asuinhuoneistojen ääneneristystä koskevat vaatimukset on vuodesta 1967 lähtien annettu ilmoittamalla pienin huoneistojen välillä sallittava ilmaääneneristysluku R_w ja suurin sallittu askeläänitasoluku $L'_{n,w}$. Ilmaääneneristysluvun mittaamenetelmä on alkujaan kehitetty laboratoriomittauksia varten (merkintä R_w). R_w kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen tutkittavan rakennusosan kautta. Laboratoriossa mittaussuhteet ja mitattavan rakennusosan pinta-ala tai lähetys- ja vastaanottohuoneen tilavuudet eivät vaikuta tulokseen, mutta rakennuksessa ne tutkimusten mukaan vaikuttavat, koska sivutiesiirtymien suhteellinen osuus vaihtelee. Siksi rakennuksessa mitattu R_w ei kuvaa äänitehon siirtymistä tilasta toiseen oikein. Sama koskee askelääneneristävyyden mittauksia. Standardit antavat mahdollisuuden määritellä ääneneristysvaatimukset myös toisin. Kenttämittaustulosten tulkinnan kannalta on oleellista, että erilaisissa tiloissa tehtyjen mittausten tulokset ovat vertailukelpoisia. Tässä suhteessa merkittäviä tekijöitä ovat huoneen tilavuus ja kalustuksen määrä, jotka vaikuttavat kaiuntaan. Se voidaan ottaa huomioon joko absorptiopinta-alan A tai jälkikaiunta-ajan T avulla. ISO 717-1 määrittelee ilmaääneneristävyyden mittaluvuiksi myös 10 m^2 vertailuabsorptioalaan normalisoidun äänitasoeroluvun $D_{n,w}$ ja $0,5 \text{ s}$ vertailujälkikaiunta-aikaan standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$. Myös askeläänitasoluku voidaan normalisoida ($L'_{n,w}$) tai standardisoida ($L'_{nT,w}$).

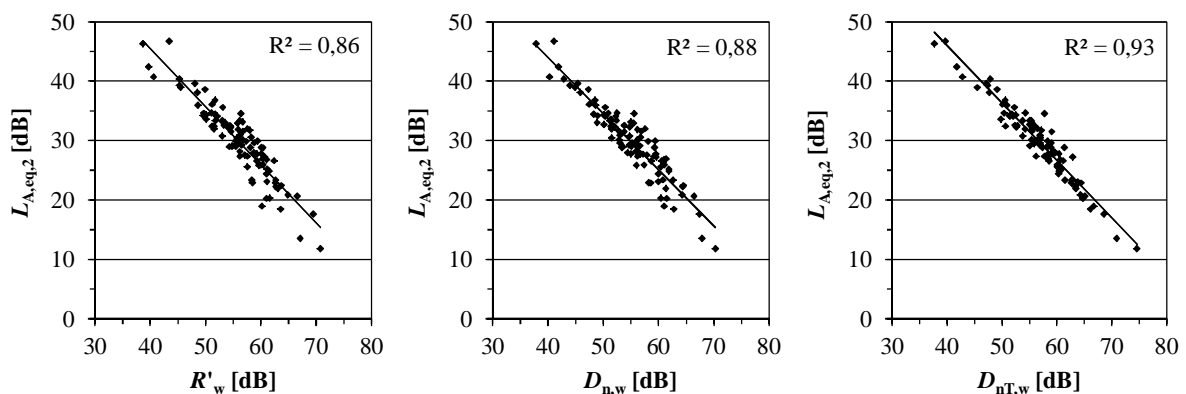
Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, mitkä standardissa esitetyistä mittaluvuista korreloivat parhaiten erilaisten asumismelujen vastaanottohuoneeseen tuottamien äänitasojen kanssa.

Menetelmät. Aineisto laskelmia varten kerättiin suuresta määrästä kenttämittauksia. Lisäksi kerättiin tietoa suomalaisten asuinhuoneiden jälkikaiunta-ajoista ja absorptioaloista. Ilmaääneneristävyyden mittaaminen perustuu lähetyshuoneen äänenpainetason ja vastaanottohuoneen äänenpainetason erotusten mittaamiseen eri taajuuksilla. Lähetyshuoneen äänenpainetaso korvattiin kuudella erilaisella asumismelun äänispektrillä, jolloin voitiin laskea kunkin asumismelun aiheuttama äänitaso $L_{A,eq}$ vastaanottohuoneeseen. Kenttämittaustulosten perusteella tutkittiin, kuinka eri mittaluvut korreloivat huoneistosta toiseen välittyneen asumismelun äänitason $L_{A,eq}$ kanssa.

Tulokset. Kalustettujen asuinhuoneiden jälkikaiunta-ajat ovat tyypillisesti $0,5 \text{ s}$ tilavuudesta riippumatta. Sitä vastoin absorptioalat kasvavat suhteessa tilavuuteen tyypillisen absorptioalan ollessa 20 m^2 . Ilmaääneneristysluku R_w korreloi huonommin vastaanottohuoneen äänitason $L_{A,eq}$ kanssa kuin standardoitu äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ kaikilla 6 asumismelun lajeilla. Askelääneneristävyyttä koskevia tuloksia ei ole julkaistu, mutta standardoitu mittaluku $L'_{nT,w}$ korreloi paremmin askeläänikojeen kalustettuun asuinhuoneeseen tuottaman äänenpainetason kanssa kuin muut mittaluvut.

Johtopäätökset. Suomessa on perusteltua harkita siirtymistä standardisoitujen mittalukujen käyttöön rakennusten ääneneristysvaatimuksissa ja -mittauksissa.

Julkaisuja. Kylliäinen et al. 2016 Appl Acoust [1]; Kylliäinen ym. 2015 Akustiikkapäivät [27]; Takala & Kylliäinen 2013 Internoise [17]; Takala 2013 Diplomityö [51].



Kuva. Ilmaääneneristävyyden mittalukujen ja huoneistosta toiseen välittyneen kovaäänisen puheen äänitason $L_{A,eq}$ välinen korrelaatio. Suuri R^2 -arvo merkitsee korkeaa selityssastetta.

4.3 Askelääneneristävyydenmittausten epävarmuus

Tausta. Askelääneneristävyyden mittaustapaa ja mittalukua $L'_{n,w}$ standardoitaessa 1960-luvulla päädyttiin valitsemaan mitattavaksi taajuusalueeksi 100–3150 Hz, vaikka taajuusaluetta 50–100 Hz pidettiin askelääneneristävyyden subjektiivisen kokemisen kannalta merkittävänä. Syy taajuusalueen valintaan oli oletus hallitsemattomasti kasvavasta mittausepävarmuudesta alle 100 Hz taajuusalueella. Vaikka askelääneneristävyyden mittaustandardi on 1990-luvulta asti sallinut taajuusalueen laajentamisen määrittelemällä mittaluvun $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$, valtaosa Euroopan maista on pitäytynyt taajuusalueen 100–3150 Hz mittaamisessa.

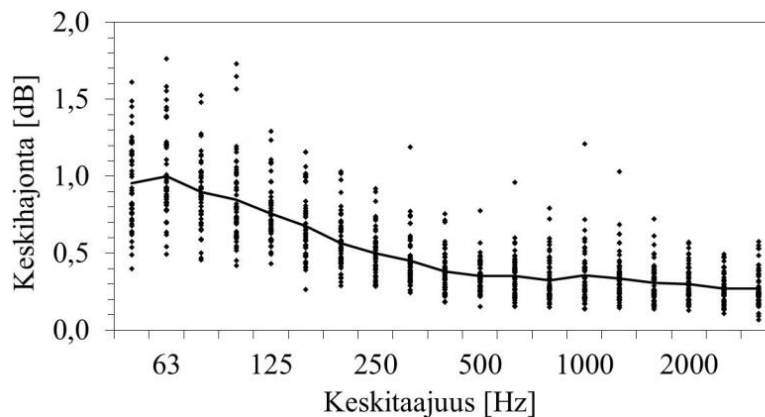
Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, kuinka paljon askeläänitasojen ja askeläänitasolukujen mittausepävarmuus kasvaa, kun taajuusalue laajennetaan 50 Hz saakka.

Menetelmät. Eri vuosina kerätyistä kenttämittausaineistoista valittiin tietoja 50 betonivälipohjan mittauksista. Tutkitut välipohjat kattoivat Suomessa käytössä olevat yleisimmät rakennetyypit. Standardit edellyttävät tiettyä vähimmäismäärää askeläänikojeen tuottamien äänenpainetasojen ja vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajan mittauksia, jotta mittaluvut voidaan laskea. Koska kenttämittausaineiston mittauksissa oli käytetty suurempaa määrää mittauspisteitä kuin standardi edellyttää, voitiin askelääneneristävyyden mittalukujen sekä taajuuksittain normalisoitujen askeläänitasojen mittausepävarmuuksia arvioida Monte Carlo –simuloinnilla. Jokaisen kenttämittauksen perusteella voitiin tehdä 9720 simulointia, joista edelleen saatiin mittaluvuille jakaumat. Niistä voitiin edelleen laskea keskihajontoja.

Tulokset. Simuloinnin tulokset osoittavat, että normalisoitujen askeläänitasojen L'_n mittausepävarmuus ei kasva taajuuden pienentyessä hallitsemattomasti. Samoin askeläänitasoluvun $L'_{n,w} + C_{1,50-2500}$ mittausepävarmuuden kasvu verrattuna nykyisin käytössä olevan mittaluvun $L'_{n,w}$ mittausepävarmuuteen on melko vähäistä. Mittalukujen epävarmuus kuitenkin riippuu rakennetyypillä. Tämä ei johdu siitä, että jokin rakennetyyppi olisi toisia alttiimpi rakennusvirheille ja edelleen hajonnalle, vaan siitä, mille taajuusalueelle mitattu askeläänispektri painottuu.

Johtopäätökset. Mittausepävarmuus ei tulosten perusteella estä mitattavan taajuusalueen laajentamista askelääneneristävyydenmittauksissa 50 Hz saakka.

Julkaisuja. Kylliäinen 2014 Acta Acust united Ac [7]; Kylliäinen et al 2014 Forum Acusticum [11]; Kylliäinen 2011 Akustiikkapäivät [43].



Kuva. Normalisoidun askeläänitason L'_n keskihajonnat taajuuksittain. Jokainen piste edustaa keskihajontaa yhdessä kaikkiaan 50 mittauksesta. Yhtenäinen viiva osoittaa keskihajontojen keskiarvon.

4.4 Ilmaääneneristävyyden mittauksen epävarmuus

Tausta. Luvussa 1 kuvattu standardiluonnos ISO CD 16717-1 sisälsi vain kaksi ilmaääneneristävyyden yksiarvoista mittalukua, R_{living} (vastaa arvoa $R_w + C_{50-5000}$) ja R_{traffic} (vastaa mittalukua $R_w + C_{\text{tr}, 50-5000}$). Kumpikin uusi mittaluku ottaa huomioon taajuusalueen 50–80 Hz. Useimmissa Euroopan maissa ovat nykyisin käytössä standardin ISO 717-1 mukaiset mittaluvut R_w ja $R_w + C_{\text{tr}}$, joiden taajuusalue on 100–3150 Hz. Yleisesti tiedettiin, että ilmaääneneristävyyden mittauserävarmuus on suuri alle 100 Hz:llä. Standardiluonnosta kirjoittaneet esittivät laskelmissaan, että uusien mittalukujen epävarmuus ei olisi suurempi kuin nykyisten. Tähän kohdistui epäilyjä eri maista. Työterveyslaitos osallistui vuonna 2001 pohjoismaiseen laboratorioiden väliseen vertailututkimukseen, jossa tarkasteltiin erityisesti taajuusalueen 50–100 Hz mittauserävarmuutta. Hankkeen loppuraportin tuloksia ei aikanaan levitetty kansainvälisesti. Vuoden 2011 tilanteessa tulosten henkiin herättäminen ja lisäanalysointi nähtiin tärkeänä.

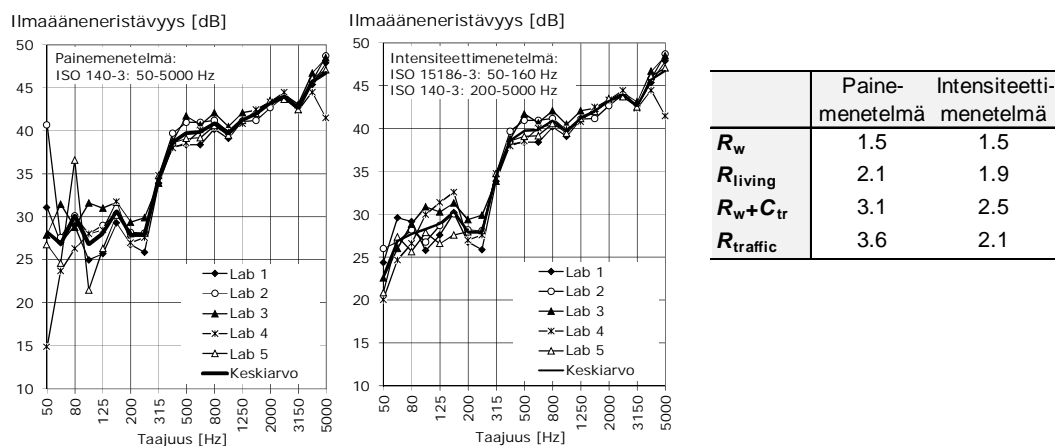
Tavoite. Tavoitteena oli vertailla painemenetelmällä (ISO 140-3) ja intensiteettimenetelmällä (ISO 15186-3) määritetyn ilmaääneneristävyyden mittauserävarmuutta taajuusalueella 50–160 Hz. Pää tavoitteena oli selvittää, onko näillä mittauserävarmuuksilla vaikutusta em. yksiarvoisten mittalukujen epävarmuuksiin. Tutkimus koskee laboratoriotestauksia.

Menetelmät. Aineistoina käytettiin vuonna 2002 Tanskassa julkaistua raporttia. Siinä esitettiin erään ikkunan ilmaääneneristävyyden mittaustulokset määritettynä Suomessa, Ruotsissa, Norjassa, Tanskassa ja Islannissa sekä paine- että intensiteettimenetelmällä. ÄKK:n tutkijat johtivat mittaustuloksista vanhojen ja uusien mittalukujen epävarmuustarkastelut, joita tanskalainen raportti ei esittänyt.

Tulokset. Painemenetelmällä mittauserävarmuus on erittäin suuri alle 100 Hz taajuuksilla kun taas intensiteettimenetelmällä epävarmuus pysyi samalla tasolla kuin 100 Hz suuremmilla taajuuksilla. Painemenetelmällä mitatuista arvoista laskettujen mittalukujen epävarmuudet olivat pääsääntöisesti suurempia kuin intensiteettimenetelmällä mitattujen. Mittalukujen R_w ja $R_w + C_{\text{tr}}$ epävarmuudet olivat 0.5 ja 0.6 dB pienempiä kuin mittalukujen R_{living} ja R_{traffic} , kun mittaus oli tehty painemenetelmällä.

Johtopäätökset. Jos siirryttäisiin uusiin mittalukuihin nykyisten sijaan, uusien mittalukujen epävarmuus pysyisi nykyisellä tasollaan, jos mittaukset on tehty intensiteettimenetelmällä. Tälle ei löydy laajaa kannatusta, koska useimmilla laboratorioilla ei ole intensiteettimittauslaitteistoja. Luopumista nykyisistä mittaluvuista R_w ja $R_w + C_{\text{tr}}$ ei nähdä tämän vuoksi perusteltuna.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2012 Acta Acust united Ac [9]; Hongisto et al. 2013 Internoise [12]; Hongisto ym. 2013 Akustiikkapäivät [36].



Kuva. Kuvaajissa saman ikkunan ilmaääneneristävyys viidessä pohjoismaisessa laboratoriossa paine- ja intensiteettimenetelmällä mitattuna. Taulukossa tuloksista laskettujen mittalukujen epävarmuusarvot.

4.5 Väliseinätyypin vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen

Tausta. Kevytrakenteiset levyrakennväliseinät eristävät pientaajuista ilmassäntä (alle 200 Hz) huomattavasti paremmin kuin raskaat kiviaineksiset seinät, vaikka seinien ilmassäntäeristysluvut R_w olisivat samat. Tieteellistä näyttöä on kuitenkin vähän siitä, onko pientaajuisten ilmassäntäeristävyyden erolla vaikutusta koettuun ääneneristykseen.

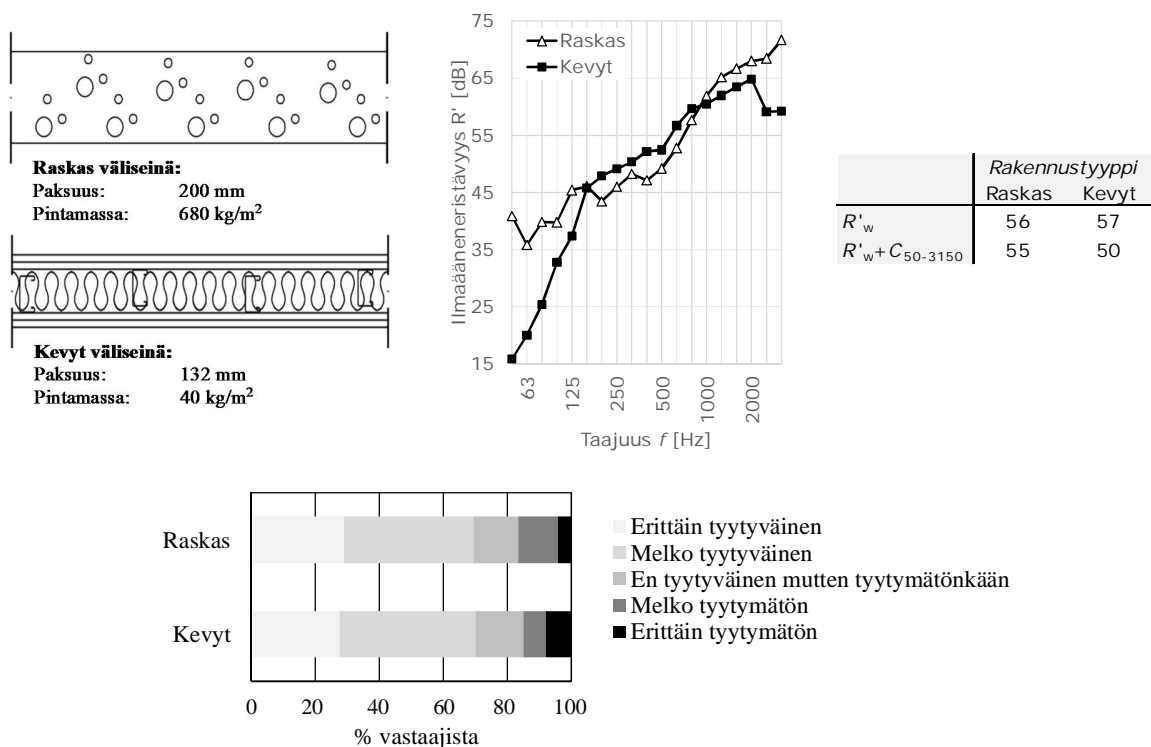
Tavoite. Tavoitteena oli vertailla asukkaiden tyytyväisyyttä ääneneristykseen uusissa asuinkerrostaloissa, joissa huoneistojen väliseinät olivat joko kevyitä tai raskaita.

Menetelmät. Tutkimus toteutettiin käyttäen ryhmien välistä asetelmaa. Tutkimukseen valittiin neljä taloa, joissa oli teräsbetoniseinä (*rakennustyyppi* Raskas), ja kaksi taloa, jossa oli kevytväliseinä (*rakennustyyppi* Kevyt). Talot valittiin yhteistyössä Turun kaupungin rakennusvalvontaviraston kanssa rakennepiirustusten perusteella. Huoneistoihin jaettiin 7-sivuinen kysely, joka mittasi tyytyväisyyttä ääneneristykseen ja äänen vaikutuksia erittäin monipuolisesti. *Rakennustyyppistä* Raskas saatiin 72 vastausta ja *rakennustyyppistä* Kevyt saatiin 87 vastausta. Vastausasteet olivat vastaavasti 62 ja 54 %. Ääneneristävyys mitattiin, jotta voitiin varmistua, että rakenteet käyttäytyivät oletetulla tavalla.

Tulokset. Molemmissa *rakennustyypeissä* R_w -arvot olivat odotusten mukaisesti samaa luokkaa. Odotusten mukaan taajuusalueen 50–160 Hz ilmassäntäeristävyys oli *rakennustyyppissä* Kevyt huomattavasti alhaisempi. *Rakennustyyppit* eivät kuitenkaan poikenneet tilastollisesti merkittävästi toisistaan asukkaiden kokemusten suhteen. Tyytyväisyys ääneneristykseen oli samalla tasolla molemmissa *rakennustyypeissä* samoin kuin erilaisten naapurimelulajien häiritsevyys ja naapurimelun vaikutukset unen laatuun.

Johtopäätökset. Jos väliseinärakenteen ilmassäntäeristysluku on luokkaa $R_w=55$ dB, rakennustyyppillä ei näyttäisi olevan vaikutusta akustiseen tyytyväisyyteen. R_w näyttäisi soveltuvan paremmin huoneistojen välisen ilmassäntäeristuksen mittaluvuksi kuin $R_w + C_{50-3150}$, koska jälkimmäinen tuotti 5 dB eron eri *rakennustyypeille*, vaikka kokemuseroja ei ollut.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2015 Building and Environment [2]; Hongisto et al. 2015 Euronoise [10]; Hongisto ym. 2015 Akustiikkapäivät [33].



Kuva. Väliseinärakenteet, ilmassäntäeristävyyssarvot ja asukkaiden tyytyväisyys ääneneristykseen.

4.6 Betonirakenteen paksuuden vaikutus naapurimelun häiritsevyyteen

Tausta. Nykymääräysten mukaan rakennettujen betonikerrostalojen rakenteet ovat selvästi paksumpia kuin 1950-luvulla rakennettujen (luku 4.1). Rakentamismääräyksiä on tarkoitettu uusiksi 2017. On kiinnostavaa tietää, onko aiemmista kiristyksistä ollut asukkaiden viihtyvyyden kannalta hyötyä.

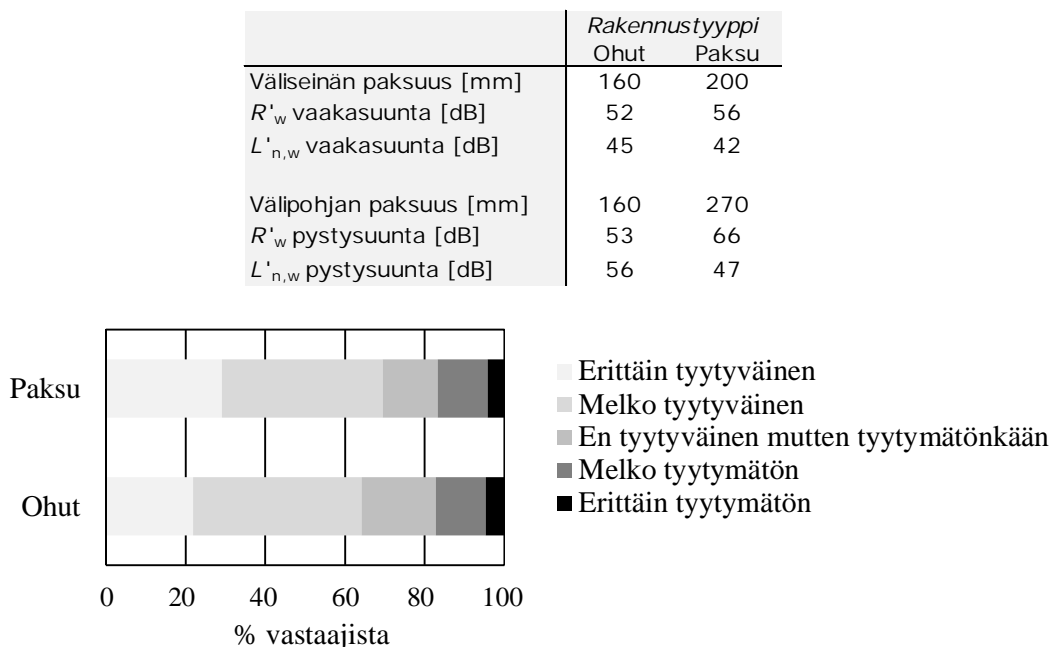
Tavoite. Selvitettiin, onko huoneistojen välisen betonirakenteen paksuudella vaikutusta ääneneristystyytyvyyteen.

Menetelmät. Tutkimus toteutettiin käyttäen ryhmien välistä asetelmaa. Tutkimukseen valittiin neljä 2000-luvulla rakennettua kerrostaloa, joissa on paksut teräsbetonirakenteet (*rakennustyyppi* Paksu) ja kaksi 1950-luvulla rakennettua kerrostaloa, jossa rakenteet ovat ohuempia (*rakennustyyppi* Ohut). Talot valittiin yhteistyössä Turun kaupungin rakennusvalvontaviraston kanssa rakennepiirustusten perusteella. Huoneistoihin jaettiin 7-sivuinen kysely, joka mittasi tyytyväisyyttä ääneneristykseen ja äänen vaikutuksia erittäin monipuolisesti. *Rakennustyyppistä* Paksu saatiin 72 vastausta ja *rakennustyyppistä* Ohut saatiin 65 vastausta. Vastausasteet olivat vastaavasti 62 ja 51 %. Ilma- ja askelääneneristävyys mitattiin, jotta voitiin varmistua, että rakenteet toimivat akustisesti oletetulla tavalla.

Tulokset. *Rakennustyyppissä* Paksu mitattu ääneneristävyys oli odotusten mukaisesti parempi kuin *rakennustyyppissä* Ohut, joten valitut talot edustivat hyvin haluttuja rakenteita. Ääneneristävyyden erot olivat odotetusti suurempia pystysuunnassa kuin vaakasuunnassa, koska rakennepaksuudet erosivat enemmän välipohjilla kuin väliseinillä. *Rakennustyyppit* eivät kuitenkaan poikenneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan asukkaiden kokemusten suhteen. Tyytyväisyys ääneneristykseen oli samalla tasolla molemmissa *rakennustyypeissä* samoin kuin erilaisten naapurimelulajien häiritsevyyden ja vaikutukset unen laatuun.

Johtopäätökset. Näyttäisi siltä, että huoneistojen välisiä ääneneristysmääräyksiä ei ole tarpeellista kiristää, koska tutkimus ei tuonut esiin selviä eroja kahden ääneneristystasoltaan selvästi erilaisen rakennustyyppin välille. Lisäksi tyytyväisyys oli melko korkealla tasolla: alle 20 % vastaajista oli tyytymättömiä ääneneristykseen. Tyytymättömyyden syynä voi olla epätavallisen voimakas naapurimelu, joka selvästi ylittää taustamelun. Siksi on todennäköistä, että ainakaan määrätason kasvattaminen muutamalla desibelillä ei merkitsevästi vähentäisi tyytymättömien osuutta.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2013 Internoise [13]; Hongisto ym. 2014 Sisäilmastoseminaari [35].



Kuva. Ylhäällä rakenteiden paksuudet ja mitatut ääneneristysarvot. Alhaalla tyytyväisyys ääneneristykseen.

4.7 Julkisivurakenteen ääneneristävyyden vaikutus tiemelun häiritsevyyteen

Tausta. Rakennuksen ulkovaipan ääneneristykseen alettiin kiinnittää aiempaa enemmän huomiota, kun valtioneuvoston päätös 993/1992 melutason ohjearvoista tuli voimaan. Tämän jälkeen rakennetuissa taloissa on pyritty siihen, että tieliikennemelun keskiäänitaso ei ylitä sisätiloissa arvoja $L_{A,eq,07-22}=35$ dB ja $L_{A,eq,07-22}=30$ dB. On hyvin vähän tutkimustietoa siitä, onko muutoksesta välillisesti johtuva ääneneristysvaatimus vähentänyt koettuja meluhaittoja ja onko nykyinen ääneneristystaso riittävä.

Tavoite. Tutkimuskysymyksenä 1 oli selvittää, koetaanko tieliikennemelusta vähemmän haittaa uusissa kerrostaloissa verrattuna vanhoihin kerrostaloihin, kun melutaso ulkona on korkea. Tutkimuskysymyksenä 2 oli selvittää, onko julkisivurakenteiden ääneneristystaso riittävä nykyisissä kerrostaloissa.

Menetelmät. Tutkimus toteutettiin käyttäen ryhmien välistä asetelmaa. Tutkimuskysymykseen 1 kohteiksi valittiin kaksi *rakennustyyppiä* alueelta, jossa tieliikennemelun äänitaso on suuri ($L_{A,eq,07-22}$ välillä 65–70 dB). *Rakennustyyppi A2* käsitti 2000-luvulla rakennetut kerrostalot. *Rakennustyyppi C2* käsitti 1950-luvulla rakennetut kerrostalot. Tutkimuskysymyksessä 2 vertailukohdaksi *rakennustyyppille A2* valittiin *rakennustyyppi A1*, joka edusti 2000-luvun kerrostaloja alhaisen tieliikennemelun alueella ($L_{A,eq}<55$ dB). Näissä taloissa oletettiin ympäristömelun haittojen olevan alhainen. Talot valittiin yhteistyössä Turun kaupungin rakennusvalvontaviraston kanssa rakennepiirustusten perusteella. Huoneistoihin jaettiin 7-sivuinen kysely, joka mittasi tyytyväisyyttä ääneneristykseen ja äänten vaikutuksia erittäin monipuolisesti. *Rakennustyypeistä A1, A2, ja C2* saatiin 72, 92 ja 89 vastausta. Vastausasteet olivat vastaavasti 62, 57 ja 64 %. Tilastollinen vertailu tehtiin *rakennustyyppien A2 ja C2* välillä, jolloin voitiin nähdä ääneneristyksen vaikutus kokemuksiin. Toinen vertailu tehtiin *rakennustyyppien A1 ja A2* välillä, jolloin voitiin nähdä, onko nykyinen ääneneristystaso riittävä.

Tulokset. *Rakennustyyppissä C2* osa subjektiivisista ympäristömelun vaikutuksista (muuttujat A, B, D ja E) oli tilastollisesti katsoen suurempi kuin *rakennustyyppissä A2*, vaikka ympäristömelutaso ulkona oli molempien *rakennustyyppien* kohdalla samaa luokkaa. Luultavasti parempi ääneneristys *rakennustyyppissä A2* selittää havaittua eroa. *Rakennustyyppien A1 ja A2* välillä merkitseviä eroja ei ollut minkään muuttujan kohdalla.

Johtopäätökset. Ääneneristystaso uusissa taloissa näyttäisi olevan riittävä, koska ympäristömelualue ei merkittävästi vaikuttanut ympäristömelusta koettuihin haittoihin (A1 ja A2 välillä ei eroja). Sen sijaan kun ympäristömelutaso ulkona oli korkea, suuremman ääneneristyksen taloissa (A2) meluhaitat olivat pääsääntöisesti alemmalla tasolla kuin pienemmän ääneneristyksen taloissa (C2). Vanhojen kerrostalojen julkisivu- ja ikkunakorjausten yhteydessä kannattaisi painottaa ääneneristyksen parannusta energiatehokkuuden rinnalla.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2013 [13]; Hongisto ym. 2014 Sisäilmastoseminaari [35].

Taulukko. Vastausten keskiarvot eri *rakennustyypeissä* sekä *rakennustyyppien* erojen tilastollinen merkitsevyys p .

	Keskiarvot			Eron merkitsevyys p	
	A2	C2	A1	A2 vs. C2	A1 vs. A2
A. Asuntoon ulkoa kuuluvasta melusta aiheutuva haitta	1.33	1.83	1.36	<0.001	n.s.
B Häiritsevyys: Ajoneuvojen äänet	1.85	2.39	1.51	<0.001	n.s.
C. Häiritsevyys: Ihmisten tai eläinten äänet pihalta	1.25	1.51	1.45	n.s.	n.s.
D Ajoneuvojen ääniä kuulevien osuus, %	82.6	95.5	82.6	<0.01	n.s.
E Nukahtamisvaikeudet ulkoa kuuluvien äänten vuoksi	1.12	1.26	1.13	<0.05	n.s.
F Herääminen ulkoa kuuluvien ääniin	1.23	1.38	1.17	n.s.	n.s.

Vastausasteikot:

- A 1 Ei lainkaan haittaa; 3 Jatkuvaa tai merkittävää haittaa
 B,C 1 Ei lainkaan; 5 Erittäin paljon
 E&F 1 En koskaan tai harvoin; 4 lähes joka yö tai joka yö

4.8 Ilmanvaihtomelun taajuusjakauma ja häiritsevyys

Tausta. Kirjallisuus on hyvin yksimielinen siitä, että A-painotettu äänenpainetaso selittää parhaiten äänistä koettua äänekkyyttä ja häiritsevyyttä, jos vertailtavien äänten laatu on kohtuullisen samanlainen (esim. erilaiset tieliikenneäänet). A-äänitaso ei välttämättä kuitenkaan selitä äänenlaadultaan hyvin erilaisten äänten häiritsevyyttä (esim. erilaiset tieliikenneäänet ja puheäänet). Äänenlaadulla tarkoitetaan esimerkiksi äänen informaation sisältöä, ennustettavuutta, spektriä, impulssimaisuutta ja kapeakaistaisuutta. Rakennusten sisällä on toisinaan tarpeellista käyttää jonkinlaista peiteääntä, jolla peitetään häiritseviä ääniä, kuten esimerkiksi puheääniä toimistossa tai kirjastossa. Peiteäänten tulisi olla laajakaistaisia, jotta ne peittäisivät ei-toivottuja ääniä. Samalla ne eivät kuitenkaan saisi ärsyttää. Kirjallisuudesta ei löydy juurikaan tutkimuksia siitä, minkälaisia laajakaistaisen äänen spektrin tulisi olla, jotta ääniin oltaisiin tyytyväisiä toimistotyön aikana.

Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, minkälaiseen taustaaänen taajuusjakaumaan ollaan tyytyväisiä toimistotyön aikana.

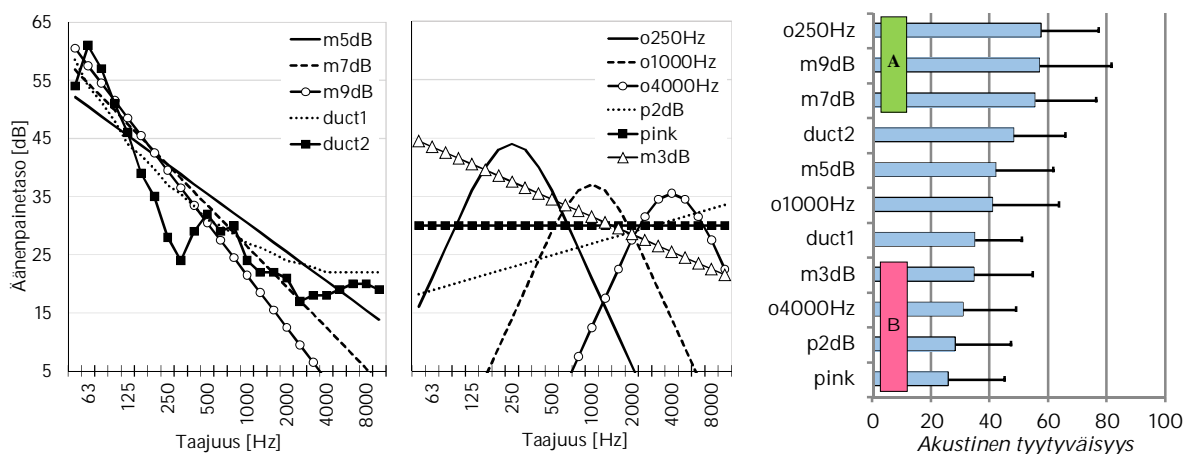
Menetelmät. Laboratoriokokeessa 23 koehenkilöä arvioi 11 spektriltään erilaisen äänen äänekkyyttä, häiritsevyyttä, miellyttävyyttä ja kolmea muuta subjektiivista mittaa. Näistä laskettiin summamuuttujana *Akustinen tyytyväisyys*, joka saa arvoja 0 (alin tyytyväisyys) ja 100 (korkein tyytyväisyys) välillä. Kaikki äänet esiteltiin tasolla $L_{A,eq,50-5000} = 42$ dB. Äänet olivat peräisin satunnaiskohinasta, jonka spektriä muokattiin terssikaistoittain haluttuun muotoon. Koehenkilöille kerrottiin, että tutkimuksen tavoitteena oli selvittää miten erilaiset ilmanvaihtoäänet koetaan. Heitä pyydettiin kuvittelemaan olevansa koko päivän ajan toimistossa, jossa vastaavaa ääntä kuuluisi ilmavaihtojärjestelmästä.

Tulokset. Koehenkilöt olivat tyytyväisimpiä ääniin, joissa painotus oli matalilla taajuuksilla (äänet ryhmässä A). Koehenkilöt olivat tyytymättömiä ääniin, joissa painotus oli suurilla taajuuksilla (äänet ryhmässä B).

Pohdinta. Yleinen mielikuva on, että pientaajuinen melu on häiritsevää. Mielikuva voi johtua siitä, että sisätiloihin ulkoa kuuluva ympäristömelu on useimmiten pientaajuista, koska suurtaajuinen melu vaimenee julkisivurakenteisiin ja ilmakehään. Sisätilaan kuuluvan ympäristömelun ongelmana ei siten ole nimenomaan melun pienitaajuisuus vaan se, että ääni ylipäättään kuuluu. Tulos ei siten ole em. mielikuvaa vastaan, jos otetaan huomioon siihen tehty täsmennys. Tuloksia ei voi yleistää laajakaistaisille äänille, jotka poikkeavat paljon tasosta 42 dB.

Johtopäätökset. Tuloksia voidaan hyödyntää mm. ilmanvaihtotuotteiden ja peiteääniratkaisujen äänenlaadun kehittämisessä.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2015 J Acoust Soc Am [3]; Oliva ym. 2015 Akustiikkapäivät [26].



Kuva. Vasemmalla tutkittujen äänten spektrit. Oikealla summamuuttujan *Akustinen tyytyväisyys* keskiarvot ja keskihajonnat. Tilastolliselta kannalta ryhmän A ääniin oltiin eniten ja ryhmän B ääniin vähiten tyytyväisiä.

4.9 Ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku

Tausta. ÄKK-hankkeen alussa vallinnut kansainvälinen keskustelu COST- ja ISO-verkostoissa (Luku 1) inspiroi tutkimusryhmäämme tuottamaan tieteellistä evidenssiä siitä keskeisestä kysymyksestä, miten nykystandardin ISO 717-1 mukaiset mittaluvut selittävät naapurimelusta koettua häiritsevyyttä verrattuna standardiehdotuksen ISO CD 16717-1 sisältämään mittalukuun R_{living} ($R_w + C_{50-3150}$).

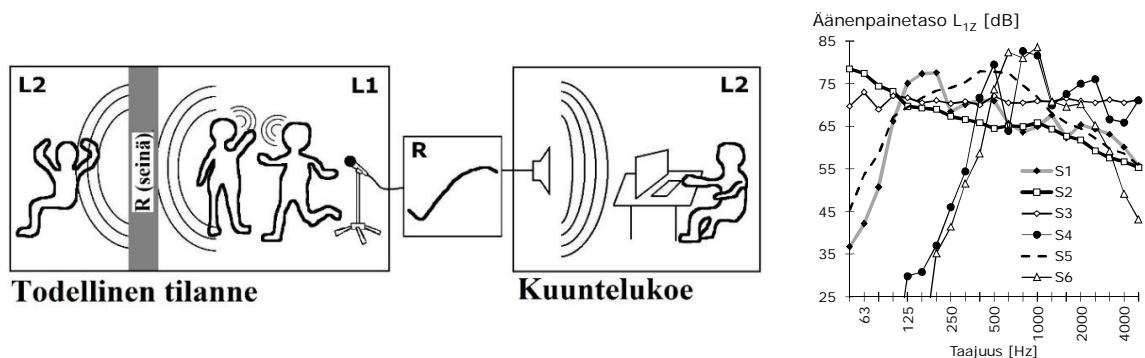
Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, mitkä standardisoidut ilmaääneneristävyyden mittaluvut selittävät parhaiten ihmisten kokemusta seinän takaa kuuluvista naapuriäänistä.

Menetelmät. Psykoakustiseen laboratoriokokeeseen rekrytoitiin 59 koehenkilöä. Kokeessa jäljiteltiin tilannetta, jossa koehenkilö kuulee naapurihuoneistosta erilaisia asumisen ääniä vuorotellen erilaisten väliseinärakenteiden kautta. Äänilajeiksi valittiin kuusi taajuusjakaumaltaan erilaista asunnoissa tyypillistä ilmaääntä, jotka nauhoitettiin asuinympäristössä. Väliseinärakenteita oli yhdeksän, joiden R_w -arvot olivat välillä 48 ja 75 dB. Mukana oli sekä kivi- että levyrakenteisia seinä pintamassojen ollessa välillä 33 ja 450 kg/m². Seinien tuottamaa ilmaääneneristysvaikutusta simuloitiin terssisuodattimilla. Äänet soitettiin verhon takana olleista kaiuttimista. Jokainen koehenkilö arvioi yhteensä 54 naapuriäänien äänekkyuden, häiritsevyyden ja hyväksytävyyden. Tässä käsitellään vain häiritsevyyden tuloksia. Seinärakenteiden mittalukuarvot määritettiin ISO 717-1 mukaan. Lopputuloksena määritettiin jokaisen äänilajin kohdalla erikseen, miten häiritsevyys korreloi seinärakenteille määritettyjen mittalukuarvojen kanssa.

Tulokset. Häiritsevyyttä selitti keskimäärin parhaiten R_w . Koska äänilajien taajuussisällöt poikkesivat toisistaan runsaasti, paras mittaluku riippuu äänilajista. Standardiehdotuksen ISO CD 16717-1 ainoaksi mittaluvuksi ehdotettu R_{living} ei selittänyt koettua häiritsevyyttä hyvin muiden kuin äänilajin S2 kohdalla. Kerrostaloissa tehtyjen kyselytutkimusten mukaan tämä äänilaji ei ole kovin yleinen: eniten valitetaan mm. kovaäänisestä puheesta, TV:n ja radion äänistä sekä lemmikkien ja lasten äänistä [13].

Johtopäätökset. Tutkimus ei tue taajuusalueen 50–80 Hz sisällyttämistä ilmaääneneristävyyttä kuvaavaan mittalukuun eikä mittalukuun $R_w + C_{50-3150}$ yksinomaista siirtymistä. Mittalukuun R_{living} siirtyminen olisi myös luvun 4.3 mukaan kyseenalaista. Tutkimuksen perusteella suositellaan mittaluvun R_w ainakin siihen asti, kunnes on olemassa tieteellistä psykoakustista näyttöä tätä paremmasta mittaluvusta.

Julkaisuja. Hongisto et al. 2014 Acta Acust united Ac [6]; Hongisto ym. 2015 Akustiikkapäivät [29].



Mittaluku	Äänilaji						Äänilajit
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	
R_w	<u>0.95</u>	<u>0.86</u>	<u>0.90</u>	0.62	<u>0.94</u>	<u>0.77</u>	S1 - Akustinen kitara, komppaus
$R_w + C_{100-3150}$	<u>0.92</u>	<u>0.90</u>	<u>0.84</u>	0.54	<u>0.86</u>	<u>0.66</u>	S2 - Musiikki bassokorostuksella
$R_w + C_{50-3150}$	<u>0.85</u>	<u>0.96</u>	<u>0.75</u>	0.46	<u>0.70</u>	0.51	S3 - Musiikki ilman bassokorostusta
$R_w + C_{tr,100-3150}$	<u>0.83</u>	<u>0.87</u>	<u>0.70</u>	0.38	<u>0.70</u>	0.47	S4 - Vauvan itku
$R_w + C_{tr,50-3150}$	0.54	<u>0.79</u>	0.42	0.22	0.31	0.17	S5 - Kovaääninen keskustelu
							S6 - Koiran haukkuminen, Chihuahua

Kuva. Ylhäällä tutkimuksessa simuloitu tilanne sekä tutkittujen äänilajien spektrit lähetyshuoneessa L1. Taulukossa on ilmaääneneristävyyden mittaluvun ja koetun häiritsevyyden keskiarvon välisen korrelaatiokertoimen r nelio. Tilastollisesti merkitsevät arvot on alleviivattu ($r^2 > 0.64$, $p < 0.01$) ja lihavoitu ($r^2 > 0.81$, $p < 0.001$). Suuri arvo tarkoittaa korkeaa selitysasetta.

4.10 Askelääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku

Tausta. Viime vuosina askelääneneristävyyttä koskeva ulkomainen tutkimus on keskittynyt puuvälipohjiin. Betonivälipohjia koskevaa psykoakustista tutkimusta ei ole tehty 1960-luvun jälkeen. ISO WD 16717-2 sisälsi ajatuksen siitä, että askelääneneristävyyden yksinomaisen mittaluku olisi $L_{n,w} + C_{l,50-2500}$ ja nykyisin yleisimmin Euroopassa käytetty mittaluku $L_{n,w}$ jäisi pois käytöstä. Tälle siirtymälle tarvitaan psykoakustista evidenssiä ensisijaisesti betonivälipohjista, koska valtaosa asuntotuotannosta Euroopassa toteutetaan edelleen betonirunkoisina.

Tavoite. Tavoitteena oli selvittää psykoakustisen tutkimuksen keinoin, mitkä standardin ISO 717-2 mukaisista askelääneneristävyyden mittaluvuista $L'_{n,w}$, $L'_{n,w} + C_l$ ja $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$ ja tutkimuskirjallisuudessa esitetyistä mittaluvuista ovat parhaiten yhteydessä ihmisten askeläänistä kokeman häiritsevyyden kanssa.

Menetelmät. Psykoakustisessa laboratorioissa selvitettiin todellisten lattiaan kohdistuvien iskuäänien (S1-S5) objektiivisen äänekkyuden ja subjektiivisesti koetun häiritsevyyden ja äänekkyuden yhteyttä askelääneneristävyyden mittalukuihin. Kokeessa jäljiteltiin tilannetta, jossa koehenkilö kuulee yläpuolisesta huoneistosta lattiaan kohdistuvia iskuääniä erilaisten välipohjarakenteiden läpi. Kokeeseen osallistui 55 koehenkilöä. Koehenkilö arvioi yhteensä 45 erilaista ääntä, jotka oli muodostettu kombinoimalla viisi erilaista iskuääntä ja 9 erilaista välipohjarakennetta ($L'_{n,w}$ -arvot välillä 41,3 - 79,9 dB). Äänet soitettiin alakaton yläpuolisista kaiuttimista. Tutkimus toteutettiin taajuusalueella 50–5000 Hz.

Tulokset. Standardissa ISO 717-2 esitetyt mittaluvut ja niille tutkimuskirjallisuudessa esitetyt vaihtoehdot selittävät kovapohjaisilla ja pehmeäpohjaisilla kengillä tapahtuvasta kävelystä sekä tuolin siirrosta koetun äänekkyuden, mutta eivät pallon pompotusta ja sukilla tapahtuvaa kävelyä. Standardoiduista mittaluvuista suositeltavin on toistaiseksi askeläänitasoluvun ja askeläänikojeen taajuusalueella 50–100 Hz tuottamat äänenpaineitasot huomioon ottavan spektripainotustermin summa $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$. Tätä mittalukua parempia objektiivisia mittalukuja ja referenssispektrejä on tarkoitus kehittää tutkimuksen tulosten perusteella jatkohankkeessa perustuen tässä kerättyyn aineistoon. Luku 4.3 osoitti, että mittausepävarmuus ei estä mitattavan taajuusalueen ulottamista 50 Hz saakka.

Johtopäätökset. Askelääneneristävyyden mittaukset on suositeltavaa jatkossa tehdä taajuusalueella 50–3150 Hz. On suositeltavaa siirtyä käyttämään mittalukua $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$ (tai $L'_{nT,w} + C_{l,50-2500}$) sekä mittauksissa että rakentamismääräyksissä. Tutkimusaineiston perusteella on kuitenkin mahdollista kehittää parempiakin mittalukuja.

Julkaisuja. Kylliäinen et al. 2015 Acta Acust united Ac [4]; Kylliäinen ym. 2015 Akustiikkapäivät [32].

Taulukko. Askelääneneristävyyden mittaluvun ja koetun häiritsevyydeskeskiarvon välisen korrelaatiokertoimen r neliö. Tilastollisesti merkitsevät arvot on lihavoitu ($r^2 > 0.12$, $p < 0.01$). Suuri arvo tarkoittaa korkeaa selitysasetta.

	Äänilaji					
	S1	S2	S3	S4	S5	
$L'_{n,w}$	0.41	0.03	0.26	0.09	0.52	S1 - Kävely kovapohj. kengillä
$L'_{n,w} + C_l$	0.50	0.05	0.32	0.13	0.47	S2 - Kävely sukkasiltaan
$L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$	0.49	0.08	0.31	0.08	0.51	S3 - Kävely pehmeäpohj. Kengillä
						S4 - Superpallon pompottelu
						S5 - Tuolin siirtäminen

4.11 Julkisivun ilmaääneneristävyyttä parhaiten kuvaava mittaluku

Tausta. Standardin ISO 717-1 mukaan ilmaääneneristävyys tieliikennemelua vastaan tulisi ilmoittaa mittaluvulla, jossa otetaan huomioon standardin mukaisen tieliikenteen spektri. Suomessa käytetään mittalukua $R_w + C_{tr}$, joka rajoittuu taajuusalueeseen 100–3150 Hz. Euroopassa on esitetty siirtymistä mittalukuun $R_w + C_{tr,50-3150}$, jossa taajuusalue on laajempi.

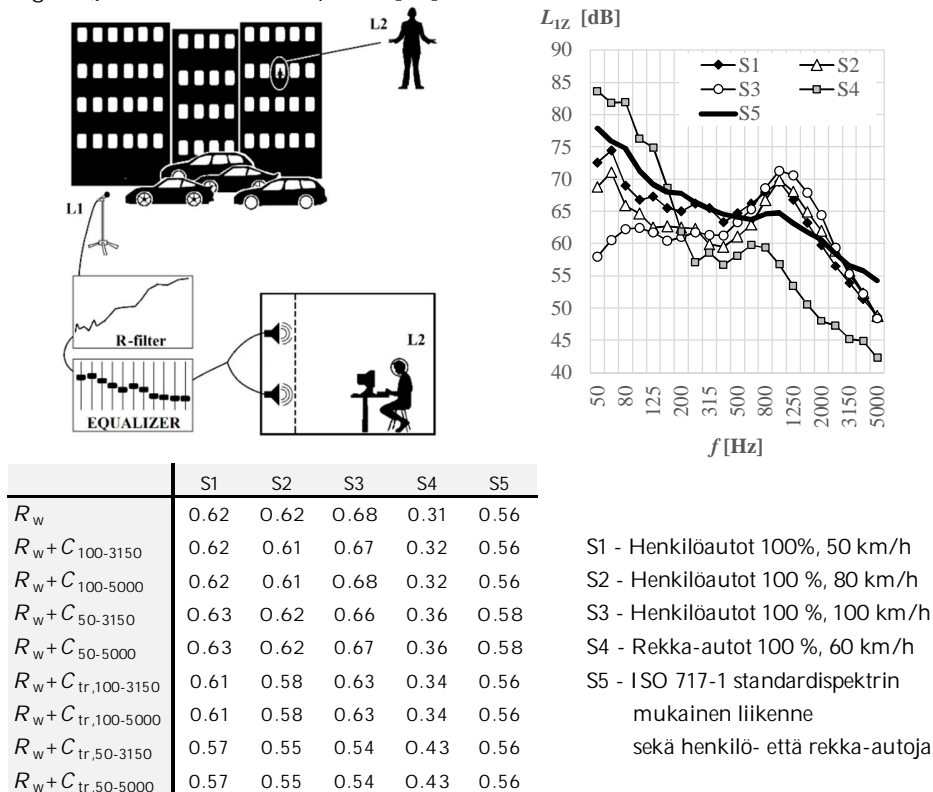
Tavoite. Tarkoituksena oli selvittää, mikä standardisoitu ilmaääneneristävyyden mittaluku selittää parhaiten tieliikennemelusta koettua häiritsevyyttä sisätiloissa.

Menetelmät. Laboratoriotutkimukseen rekrytoitiin 43 koehenkilöä. Kokeessa simuloitiin tilannetta, jossa koehenkilö kuulee tieliikennemelua sisätilaan julkisivurakenteen kautta. Koehenkilö arvioi yhteensä 60 erilaista ääntä, jotka oli muodostettu kombinoimalla viisi erilaista tieliikennemelua (S1-S5) ja 12 erilaista julkisivurakennetta. Äänet soitettiin verhon takana olleista kaiuttimista. Julkisivurakenteiden ääneneristysarvot olivat välillä 27–55 dB ($R_w + C_{tr}$).

Tulokset. Häiritsevyyttä selittivät henkilöautoliikenteen kohdalla (S1-S3) nykyistä mittalukua $R_w + C_{tr}$ paremmin mittaluvut R_w , $R_w + C_{100-3150}$ ja $R_w + C_{50-3150}$. Pelkkien rekka-autojen (S4) tapauksessa paras mittaluku oli $R_w + C_{tr,50-3150}$. Yleensä rekkojen osuus tieliikenteestä on alle 10 %, joten äänilajin S4 mukaista spektriä ei esiinny missään pysyvästi. Standardispektrin mukaisen melun (S5) kohdalla mittaluvut olivat tasavahvoja.

Johtopäätökset. Tutkimus ei anna tukea sille, että siirryttäisiin käyttämään mittalukua $R_w + C_{tr,50-3150}$ mittaluvun $R_w + C_{tr}$ sijaan. Tiemelun spektrit vaihtelevat merkittävästi eri nopeuksilla ja ajoneuvotyypeillä. Jos julkisivurakenteiden ääneneristysmitoitusta halutaan järkevästään, olisi perusteltua siirtyä käyttämään mittalukua R_w nopeiden väylien varrella, jossa rengasmelu dominoi. Hitaan ja raskaita ajoneuvoja sisältävän tieliikenteen kohdalla ISO 717-1 mukainen tieliikennemelun referenssispektri on edustava ja $R_w + C_{tr}$:n käyttö edelleen suositeltavaa.

Julkaisu. Hongisto ym. 2015 Akustiikkapäivät [28].



Kuva. Ylhäällä periaatekuva kokeen järjestelystä sekä tarkasteltujen tieliikenteiden spektrit. Alhaalla on taulukoitu ilmaääneneristävyyden mittaluvun ja koetun häiritsevyydeskeskiarvon välisen korrelaatiokertoimen r neliö. Kaikki arvot olivat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0.01$). Parhaat arvot on lihavoitu.

4.12 Toimistohuoneiden ääneneristys ja työtehokkuus

Tausta. Toimistohuoneille ei esitetä ilmajärjestelmävaatimuksia Suomen rakentamismääräyskokoelman (RakMK) osassa C1:1998. Standardin SFS 5907 luokan C mukaan ilmajärjestelmäluvun R_w tulisi olla vähintään 35 dB. Alhaisen ohjetason vuoksi toimistohuoneiden välillä käytetään yleensä kevyimpiä mahdollisia levyrakenneseiniä (levy 1, tukiranka ja villatäyte, levy 2). Yhä useammin seinät toteutetaan modulaarisina, jolloin tiivistyksistä usein tingitään. Lisäksi väliseinissä voi olla läpivientiaukkoja, joiden tiivistys jää helposti puolitiehen. Toimistohuoneiden välillä mitatut R_w -arvot ovat 25 ja 45 dB välillä riippuen väliseinätyypistä, tiivistyksestä ja sivutiesiirtymistä. RakMK:n osan D2:2010 mukaan ilmanvaihdon aiheutuvan melutason tulisi alittaa 33 dB $L_{A,eq}$. Tämä ei ole riittävä peittämään alleen naapurihuoneesta kuuluvaa puhetta. Työpaikkakäynneillä on havaittu, että ääneneristys koetaan usein riittämättömäksi, vaikka edellä mainitut ohjearvot täyttyisivät. Syynä voi olla liian alhainen taustamelutaso, puutteellinen ääneneristys, huoneiden liiallinen kaiunta tai kovaääninen puhuja naapurihuoneessa.

Tavoite. Tavoitteena oli määrittää kognitiivisen psykologian keinoin, missä määrin naapurihuoneesta kantautuvat puheäännet häiritsevät ja vaikuttavat työtehokkuuteen, kun ääneneristys on ohjearvojen mukainen verrattuna tilanteisiin, jossa ääneneristävyttä ja/tai taustäänitason on kasvatettu 10 dB.

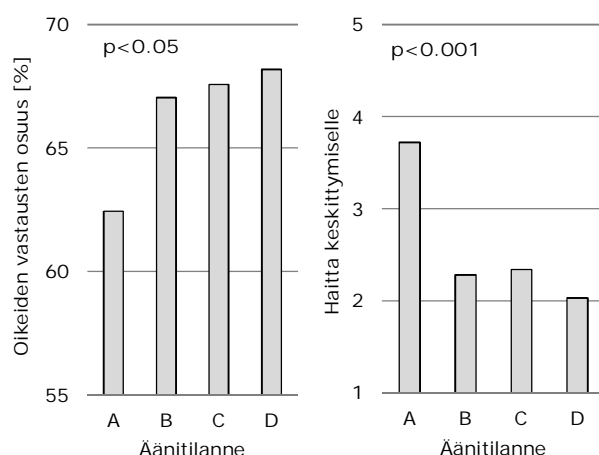
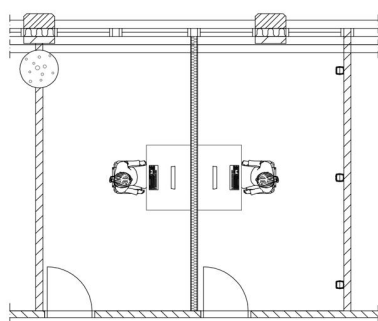
Menetelmät. Kokeeseen osallistui 32 koehenkilöä. Jokainen osallistui neljään äänitilanteeseen (A–D), joissa kombinoitiin kaksi ääneneristystasoa ja kaksi peiteäänitason. Kussakin äänitilanteessa koehenkilö kuuli naapurihuoneesta puhetta mutta puheen erotettavuus vaihteli tilanteiden välillä erilaisen ääneneristävyden ja taustamelutason vuoksi. Käytetty puhe oli tasoltaan normaalia (59 dB metrin päässä). Äänitilanteista laskettiin myös puheensiirtoindeksi STI arvot. STI kuvaa puheen erotettavuutta asteikolla 0–1. Kukin koetilanne kesti noin 30 minuuttia, jonka aikana koehenkilö teki kolme tehtävää ja vastasi lopuksi äänitilannetta koskevaan kyselyyn.

Tulokset. Äänitilanteessa A työtehokkuus oli heikompi verrattuna muihin tilanteisiin. Koetut haitat olivat suurimmat äänitilanteessa A kaikilla subjektiivisilla mittareilla mitattuna.

Johtopäätökset. Toimistohuoneita koskevia ääneneristysvaatimuksia tulisi kasvattaa. Ilmanvaihdon melutasolle on käytännössä vaikea asettaa minimivaatimustasoa. Helpointa muutos olisi toteuttaa kasvattamalla ääneneristävyden vaatimus tasolle 40 dB R_w , koska tämä on mahdollista toteuttaa hyvällä akustiikkasuunnittelulla ja tiiviydellä ilman, että väliseinien rakentamiskustannuksia pitää kasvattaa nykyisestään. Ohjearvo olisi tärkeä saada takaisin Suomen rakentamismääräyskokoelman piiriin, jotta huonolaatuisia toimistoväliseiniä ei rakennettaisi.

Julkaisu. Hongisto ym. 2015 Akustiikkapäivät [31].

	A	B	C	D
Ilmajärjestelmäluvun R_w [dB]	35	45	35	45
Ilmastoinnin äänitaso $L_{A,eq}$ [dB]	32	32	43	43
Puheen äänitaso $L_{A,eq}$ [dB]	32	22	32	22
Puheensiirtoindeksi STI	0.49	0.21	0.09	0.00



Kuva. Äänitilanteiden A–D akustiset kuvaukset, kokeessa simuloitu työhuonepari sekä keskeiset tulokset koskien työtehokkuutta sarjamuistitehtävässä ja äänitilanteen aiheuttama keskittymishaitta (Asteikko: 1 Ei lainkaan, 5 Erittäin paljon).

4.13 Tieliikennemelun taajuusjakauman vaikutus uneen

Tausta. Suomessa julkisivurakenteiden ääneneristävyyttä tieliikennemelua vastaan mitoitetaan siten, että keskiäänitasot 35 dB $L_{A,eq,07-22}$ ja 30 dB $L_{A,eq,22-07}$ eivät ylitä asuinhuoneissa. Rakenteiden valinta tehdään yleensä ympäristöohjeen 108:2003 mukaan. Sama ääneneristystaso voidaan saavuttaa hyvin erilaisilla komponentti- valinnoilla. Sen vuoksi tiemelun spektri sisätiloissa vaihtelee paljon asuntojen välillä. Yleisesti uskotaan, että pientaajuinen melu on häiritsevää. Luvun 4.8 kuuntelukoe kuitenkin osoitti, että ihmiset valitsevat mieluummin pientaajuisen kuin keskitaajuisen tai korkeataajuisen melun, jos äänitaso pidetään samana. Unitutkimusta koskeva tiedekirjallisuus ei sisällä tiemelun spektriä koskevia tutkimuksia.

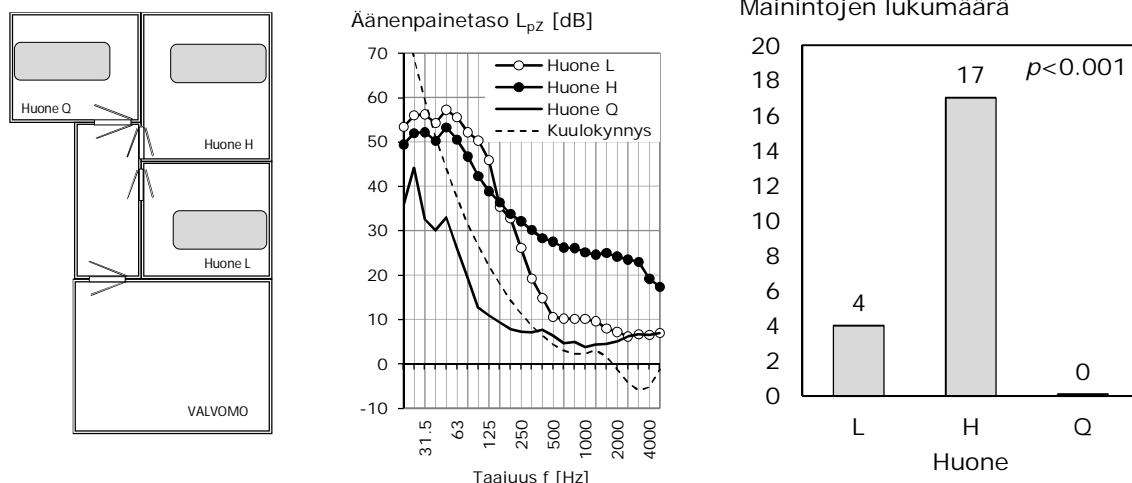
Tavoite. Tavoitteena oli selvittää, miten sisälle kuuluvan tieliikennemelun taajuusjakauma vaikuttaa unen laatuun, kun A-äänitaso pidetään samana.

Menetelmät. 21 koehenkilöä nukkui TTL:n unilaboratoriossa Helsingissä 3 perättäistä yötä (klo 23–07). Koehenkilön tuli asua kerrostalossa vilkkaasti liikennöidyn kadun varrella, jotta tieliikenneäänet eivät tuntuisi vierailta. Koehenkilö ei saanut tehdä yötyötä eikä hänellä saanut olla lääkärin diagnosoimaa unihäiriötä, uneen vaikuttavaa lääkitystä tai sairautta. Kukin yö nukuttiin eri huoneissa. Huoneet poikkesivat äänitason suhteen. Huoneessa L pientaajuinen moottorimelu dominoi (37 dB $L_{A,eq}$), huoneessa H korkeataajuinen rengasmelu dominoi (37 dB) ja huone Q oli hiljainen (19 dB). Tiemelu oli nauhoitettu klo 23–07 Turun keskustassa vilkasliikenteisessä paikassa, jossa myös bussiliikenne oli vilkasta. Spektrit muokattiin terssikaistoittain taajuusalueella 20–5000 Hz niin, että nukkujan pään alueella spektri oli haluttu. Tieliikenteen ääni soitettiin valeikkunoiden takaa ja ääni kuulosti huoneissa erittäin luonnolliselta. Koehenkilöiltä mitattiin mm. aivosähkökäyrä (EEG), silmänliikkeet (EOG) ja lihastonius (EMG) unilokitusta ja havahtumisindeksiä varten. Subjektivisia kokemuksia ja tuntemuksia kerättiin sekä aamuisin että iltaisin. Koejakson jälkeen pyydettiin kokonaisarviota siitä, missä huoneessa ääniympäristö häiritsi eniten nukkumista.

Tulokset. Huoneet L ja H erosivat huoneesta Q lähes kaikilla subjektiivisilla mittarilla mutta huoneet L ja H eivät yleensä eronneet toisistaan. Äänitilanteella ei yllättäen ollut vaikutusta unen kokonaiskestoan tai nukah- tamisen kestoan. Palautumiselle tärkeää syvää unta NREM3 nukuttiin huoneissa L ja H vähemmän kuin huoneessa Q mutta muiden univaiheiden keston suhteen huoneiden välillä ei havaittu eroja. Huoneiden äänitilan- teet eivät vaikuttaneet nukutun yön jälkeen itsearvioituun vireyteen, kuormittuneisuuteen, mielialaan tai pa- lautumiseen, joten huoneiden L ja H äänitasot eivät olleet liian korkeita. Koehenkilöistä 81 % arvioi kuitenkin kokeen jälkeen, että huone H oli unen kannalta häiritsevin.

Johtopäätökset. Melun taajuusjakaumalla ei voitu nähdä kiistattomia vaikutuksia unen laatuun. Tulokset puoltavat sitä, että julkisivurakenteita suunniteltaessa kannattaisi kiinnittää ensisijaisesti huomiota taajuuksiin 250–5000 Hz.

Julkaisuja. Karjalainen 2015 Turun yliopisto [50]; Varjo ym. 2015 Akustiikkapäivät [34].



Kuva. Vasemmalla unilaboratorion pohjakuva, keskellä tutkittujen tiemelujen spektrit ja oikealla koehenkilöiden antama loppuarvio siitä, missä huoneessa ääniympäristö häiritsi eniten nukkumista.

5 JATKOTUTKIMUSTARPEET

1. Puukerrostalot ovat yleistymässä merkittävästi. ÄKK-hankkeessa puukerrostalot rajattiin pois sekä laboratorio- että kenttätutkimuksista, koska mukana ei ollut yrityksiä, joiden kanssa yhteistyötä olisi ollut mielekästä toteuttaa. Vastaavaa ääneneristystutkimusta tulisi laajentaa koskemaan puukerrostaloja ja niissä käytettäviä rakenteita, koska ÄKK:ssa kehitetyt menetelmät ovat niihin helposti sovellettavissa. Lisäksi ÄKK tarjoaa vertailuaineistoja kivirakenteisista ratkaisuista, joihin puukerrostalojen tuloksia voidaan verrata.
2. Melun häiritsevyyden tutkimiseksi kehitettiin sekä kentälle että laboratorioympäristöön soveltuvia menetelmiä, jotka on tieteellisten artikkelien julkaisemisen perusteella myös kansainvälisesti hyväksytty. Menetelmiä kannattaisi soveltaa muidenkin melulajien kuin naapurimelun, ilmanvaihtomelun tai tieliikennemelun häiritsevyyden tutkimukseen. Erityisen mielenkiinnon kohteena ovat erityispiirteitä (ka-peakaisuus, impulssimaisuus) sisältävät ympäristömelun lajit. Tätä koskevaa jatkotutkimushanketta on alettu suunnitella 2015.
3. Työpakettien 8 ja 9 psykoakustisten koeaineistojen perusteella on tarkoitus kirjoittaa kaksi jatkotutkimusta, jotka sisältävät vaihtoehtoiset referenssispektrit ilma- ja askelääneneristävyyden mittalukujen määrittämiseksi. Tätä tutkimustietoa on toivottu standardisointityöryhmässä ISO TC43/SC2/WG18, joka todennäköisesti aloittaa standardiluonnoksen ISO 16717 kaltaisen kehitystyön uudestaan seuraavien vuosien aikana.
4. Kerrostaloissa tehty kyselytutkimukset olisi hyvä vahvistaa ulkomailla tehdyllä vastaavalla tutkimuksella, koska suomalaisten elämäntyyli ja tottumukset voivat poiketa ulkomaiden vastaavasta.
5. Tutkimustulosten perusteella on mahdollista kehittää rakenneratkaisuja, jotka vastaavat nykyistä paremmin ihmisten subjektiivista kokemusta hyvästä ääneneristävydestä.

6 SUOSITUKSET MÄÄRÄYKSIÄ JA OHJEITA KOSKIEN

Tutkimusryhmän näkemykset suomalaisia ääneneristystä koskevien määräysten ja ohjeiden kehittämiseksi ovat seuraavat:

- Asuinkerrostalojen ääneneristysvaatimuksia ei tarvitse kasvattaa. Uusissa rakennuksissa tyytymättömyys ääneneristykseen on erittäin alhainen sekä hiljaisilla että meluisilla alueilla.
- Tavanomaisten huoneistojen tai huonetilojen välisen ilmaääneneristävyyden mittauksia ei tarvitse laajentaa taajuusalueen 100–3150 Hz ulkopuolelle. Ilmaääneneristävyyden mittaluvuksi on suositeltavaa valita $D_{nT,w}$ nykyisen R_w sijaan (normalisointi 0,5 sekunnin jälkikaiunta-aikaan). $D_{nT,w}$ ottaa huomioon taajuusalueen 100–3150 Hz.
- Askelääneneristävyyden mittaukset tulisi laajentaa koskemaan taajuusaluetta 50–3150 Hz. Askelääneneristävyyden mittaluvuksi tulisi valita joko $L'_{n,w} + C_{l,50-2500}$ tai $L_{nT,w} + C_{l,50-2500}$ nykyisen mittaluvun $L'_{n,w}$ sijaan.
- Toimistohuoneiden välisen ilmaääneneristysluvun R_w ohjearvo SFS 5907 standardin luokassa C tulisi kohottaa arvosta 35 dB arvoon 40 dB.
- Julkisivurakenteiden ilmaääneneristävyys tiemelu vastaan kannattaisi mitoittaa tulevaisuudessa käyttäen kahta toisistaan poikkeavaa mittalukua:
 - o R_w tai $R_w + C$, kun kyseessä on nopeakulkuinen väylä (60 km/h tai yli), jossa rengasmelu dominoi.
 - o $R_w + C_{tr}$, kun kyseessä on hidas liikenne (50 km/h) tai risteysalue, jossa moottorimelu dominoi.

Kuntien rakennusvalvonnan ja rakennustuotevalmistajien parissa tulisi järjestää koulutusta koskien julkisivurakenteiden ääneneristysmitoitusta (ympäristöministeriön ohje 108:2003), koska rakennusprojekteista ja tuotekehityshankkeista saatu kokemus osoittaa, että ohjetta ei hallita tarpeeksi hyvin alan toimijoiden parissa.

LIITE 1. HANKKEEN TUOTTAMAT JULKAISUT

Alla on lueteltu viittaustiedot hankkeen tuottamiin julkaisuihin. Projektin julkisilla internet-sivuilla on esitetty linkki julkaisuihin.

Hankkeen internet-sivut:

http://www.ttl.fi/fi/tutkimus/hankkeet/tyoymparisto/rakennusten_aaniympariston_kehittaminen/Sivut/default.aspx

Julkaisujen linkit sisältävä sivu:

http://www.ttl.fi/fi/tutkimus/hankkeet/tyoymparisto/rakennusten_aaniympariston_kehittaminen/Sivut/ÄKK_hankkeen_julkaisuasettelo.aspx

Vertaisarvioitua tieteellisiä julkaisuita (9 kpl)

1. Kylliäinen M, Takala J, Oliva D, Hongisto V, Justification of standardized level differences in rating of airborne sound insulation between dwellings, *Applied Acoustics* 102 2016 12-18.
2. Hongisto V, Suokas M, Mäkilä M, Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – the effect of wall construction, *Building and Environment* 85 2015 309-320.
3. Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Subjective and Objective Rating of Spectrally Different Pseudorandom Noises – Implications for Speech Masking Design, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3) 2015 1344-1355.
4. Kylliäinen M, Lietzén J, Kovalainen V, Hongisto V, Correlation between single-number quantities of impact sound insulation and sound spectra of walking on concrete floors, *Acta Acustica united with Acustica* 101 2015 975-985.
5. Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Response to Parmanen, Letter-to-the-Editor, *Acta Acustica united with Acustica*, 101 2015 467-469.
6. Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Subjective and objective rating of airborne sound insulation – living sounds, *Acta Acustica united with Acustica*, 100 2014 848-863.
7. Kylliäinen M, The measurement uncertainty of single-number quantities for rating the impact sound insulation of concrete floors. *Acta Acustica united with Acustica*, 100 2014 640-648.
8. Kylliäinen M, Lietzén J, Asuinkerrostalojen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955-2008, *Tekniikan Waiheita* 1/13 2013 5-23.
9. Hongisto V, Keränen J, Kylliäinen M, Mahn J, Reproducibility of the present and proposed single-number quantities of airborne sound insulation, *Acta Acustica united with Acustica* 98 2012 811-819.

Ulkomaiset kongressijulkaisut (13 kpl)

10. Hongisto V & Suokas M, Satisfaction with sound insulation in residential dwellings – heavy versus light wall construction, *Euronoise* 2015, 31 May - 3 June, Maastricht, Netherlands.
11. Kylliäinen M., Kovalainen V., Lietzén J. & Hongisto V. 2014. Uncertainty of alternative single-number quantities for rating of impact sound insulation. *Forum Acusticum* 2014. Krakow, September 7–12, paper SS01-5.
12. Hongisto V, Kylliäinen M, Keränen J, Mahn J, Effect of measurement method on the reproducibility value of the single number quantities of airborne sound insulation, paper 878, *Internoise* 2013, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
13. Hongisto V, Mäkilä M, Haapakangas A, Hakala J, Hyönä J, Kylliäinen M, Acoustic satisfaction in multi-storey buildings built after 1950 - preliminary results of a field survey, paper 835, *Internoise* 2013, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
14. Hongisto V, Oliva D, Keränen J, Disturbance caused by airborne living sounds heard through walls - preliminary results of a laboratory experiment, paper 849, *Internoise* 2013, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
15. Keränen J, Lietzén J, Kylliäinen M, Hongisto V, Improvement of impact sound reduction by floor coverings - measurements using a small floor mock-up and an impact sound laboratory, *Internoise* 2013, paper 530, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
16. Lietzén J, Kylliäinen M, Kovalainen V, Hongisto V, Evaluation of impact sound insulation of intermediate floors on the basis of tapping machine and walking, *Internoise* 2013, paper 530, 15-18 September, Innsbruck, Austria.
17. Takala J, Kylliäinen M, Room acoustics and background noise levels in furnished Finnish dwellings, *Internoise* 2013, paper 207, 15-18 September, Innsbruck, Austria.

18. Virkkala J, Using accelerometers as actigraphs, Abstract in: Journal of Sleep Research 21 (Suppl. 1) 2012 198-199, Poster presented in 21st Congress of the European Sleep Research Society Paris, France.
19. Kylliäinen, M. 2012. Rating of floors with the proposed impact sound reduction index. Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting BNAM2012. Odense, Danish Acoustical Society, June 18-20, paper no. 14.
20. Kylliäinen, M. 2012. The uncertainty of single-number quantities for evaluation of impact sound insulation at the enlarged frequency range. 8th European Conference on Noise Control Euronoise 2012. Prague, June 10-13, pp. 1466-1471.
21. Lietzén, J. & Kylliäinen, M. 2012. The development of sound insulation between Finnish dwellings from 1955 to 2008. 8th European Conference on Noise Control Euronoise 2012. Prague, June 10-13, pp. 1459-1464.
22. Kylliäinen, M. 2011. The accuracy of impact sound insulation measurements in field conditions. Forum Acusticum 2011. Aalborg, June 27 – July 01, pp. 1377-1382.

Suomalaiset seminaarijulkaisut (24 kpl)

23. Hongisto V, Kylliäinen M, Hyönä J, ÄKK-hankkeen suositukset tulevaisuuden ääneneristysmääräyksiä koskien, Rakennusfysiikka 2015, 20-22.10. Tampere, 561-566, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
24. Hongisto V, Suokas M, Kerrostaloasukkaat ovat yhtä tyytyväisiä betoni- ja kipsiseinien äänieristykseen, Rakennusfysiikka 2015 20-22.10 Tampere, 579-582, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015.
25. Varjo J, Hongisto V, Leppämäki H, Oliva D, Hyönä J, Toimistohuoneiden välisen ääneneristuksen ja taustamelutason vaikutus työtehokkuuteen, Sisäilmastoseminaari 2015, 11.3.2015 Helsinki, SIY Raportti 33, 161-166, Sisäilmayhdistys ry, Helsinki.
26. Oliva D, Hongisto V, Rekola L, Äänen taajuusjakauma ja ääniympäristötyytyväisyys, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 15-18, Akustinen Seura ry. Espoo.
27. Kylliäinen M, Takala J, Hongisto V, Ilmaääneneristysluku sekä standardoitu ja normalisoitu äänita-soeroluku huoneistojen välisen ilmaääneneristävyyden kuvaajina, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 158-161, Akustinen Seura ry. Espoo. (poster)
28. Hongisto V, Oliva D, Rekola L, Julkisivun koettu ääneneristys tiemelua vastaan – Mitä mittalukua tulisi käyttää? Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 162-165, Akustinen Seura ry. Espoo. (poster)
29. Hongisto V, Oliva D, Millä mittaluvulla asuinhuoneistojen välinen ilmaääneneristys pitäisi ilmoittaa? Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 166-169, Akustinen Seura ry. Espoo. (poster)
30. Keränen J, Hongisto V, Puheäänen leviäminen avotoimistossa – mittauksiin perustuva malli, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 181-184, Akustinen Seura ry. Espoo.
31. Hongisto V, Varjo J, Leppämäki H, Oliva D, Hyönä J, Toimistohuoneiden välisen ilmaääneneristuksen vaikutus työtehokkuuteen, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 198-203, Akustinen Seura ry. Espoo.
32. Kylliäinen M, Oliva D, Rekola L, Hongisto V, Asuinhuoneistojen betonivälipohjien askelääneneristuksen subjektiivinen ja objektiivinen arviointi, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 204-207, Akustinen Seura ry. Espoo.
33. Hongisto V, Suokas M, Tyytyväisyys äänieristykseen kerrostaloasunnoissa – väliseinän rakennetyypin vaikutus, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 208-211, Akustinen Seura ry. Espoo.
34. Varjo J, Hongisto V, Karjalainen S, Virkkala J, Oliva D, Salo P, Teliikennemelun taajuusjakauman vaikutus unen laatuun – laboratoriotutkimus, Akustiikkapäivät 2015, 1-2.9.2015 Kuopio, 212-215, Akustinen Seura ry. Espoo.
35. Hongisto V, Haapakangas A, Mäkilä M, Hyönä J, Kylliäinen M, Melun vaikutukset asuinkerrostaloissa, Sisäilmastoseminaari 2014, Sisäilmastoseminaari 2014, 13.3.2014 Helsinki, SIY Raportti 32, 269-274, Sisäilmayhdistys ry, Helsinki.
36. Hongisto V, Keränen J, Kylliäinen M, ISO CD 16717-1 mukaiset uudet ilmaääneneristysluvut - epävarmuuden ja muiden seuraamusten tarkastelua, Akustiikkapäivät 2013 22-23.5.2013 Turku, 19-24, Akustinen Seura ry.
37. Hongisto V, Kylliäinen M, ISO CD 16717-1 mukaiset uudet ilmaääneneristysluvut - epävarmuuden ja muiden seuraamusten tarkastelua, Rakennusfysiikka 2013, 323-330, 22-24.10.2013 Tampere.
38. Hongisto V, Mäkilä M, Haapakangas A, Kylliäinen M, Hyönä J, Äänieristystyytyväisyys suomalaisissa asuinkerrostaloissa - kyselytutkimus, Rakennusfysiikka 2013, 331-338, 22-24.10.2013 Tampere.
39. Kylliäinen M, Lietzén J, Betonirakenteiden asuinkerrostalojen ääneneristuksen kehittyminen Suomessa. Rakennusfysiikka 2013, 307-314, 22-24.10.2013 Tampere.

40. Kylliäinen M, Lietzén J, Kovalainen V, Hongisto V, Välipohjien askelääneneristävyyden askeläänikojeen ja kävelyn perusteella, Rakennusfysiikka 2013, 315-322, 22-24.10.2013 Tampere.
41. Lietzén J, Kylliäinen M, Kovalainen V, Hongisto V, Välipohjien askelääneneristävyyden arviointi askeläänikojeen ja kävelyn perusteella, Akustiikkapäivät 22-23.5.2013 Turku, 117-122, Akustinen Seura ry.
42. Lietzén J, Kylliäinen M. Asuinhuoneistojen välisen ääneneristävyyden kehittyminen Suomessa vuosina 1955-2008. Akustiikkapäivät 2013. Turku, 22.-23.5., Akustinen Seura ry, s. 123-128.
43. Kylliäinen, M. 2011. Askelääneneristävyyden mittausepävarmuus kenttämittauksissa. Akustiikkapäivät 2011. Tampere, 11.-12.5., Akustinen Seura ry, s. 319-324.
44. Hongisto V, Koskinen V, Tieliikennemelun spektripainotusermi ylikorostaa pientaajuisten melun osuutta, Akustiikkapäivät 2011, Tampere 11-12.5.2011, 389-394, Akustinen Seura ry, Espoo, 2011.
45. Oliva D, Hongisto V, Keränen J, Koskinen V, Sisätilan pientaajuisten melun uusi mittausmenetelmä, Akustiikkapäivät 2011, Tampere 11-12.5.2011, 365-370, Akustinen Seura ry, Espoo, 2011.
46. Keränen J, Hongisto V, Oliva D, Julkisivun ääneneristävyyden mitoittamisen epävarmuus, Akustiikkapäivät 2011, Tampere 11-12.5.2011, 371-376, Akustinen Seura ry, Espoo, 2011.
47. Virjonen P, Hongisto V, Keränen J, Ilmaääneneristävyyden laboratoriotestaus pientaajuuksilla - intensiteetti- vai painomenetelmä? Akustiikkapäivät 2011, Tampere 11-12.5.2011, 377-382, Akustinen Seura ry, Espoo, 2011.

Tieteelliset raportit (2 kpl)

48. Koskinen V, Hongisto V, Tieliikennemelun taajuusjakauma, Sisäympäristölaboratorio, Turku, Työterveyslaitos, Helsinki, 2011.
49. Oliva D, Hongisto V, Keränen J, Koskinen V, Measurement of low frequency noise in rooms, Indoor Environment Laboratory, Turku, Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, 2011.

Opinnäytetyöt (4 kpl)

50. Karjalainen S, Primary and secondary effects of nocturnal traffic noise with different audio frequencies on sleep, Master's thesis, University of Turku, Psychology, June 2015, Turku, Finland.
51. Takala J, Suomalaisten asuinhuoneiden ääniolosuhteet ja ääneneristävyyden mittauksista, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Marraskuu 2013, Tampere.
52. Lietzén J, Välipohjien askelääneneristävyyden arviointi eri askeläänierätyksien perusteella, Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2012.
53. Kovalainen V, Rakenteiden ilmaääneneristävyyden arviointi nykyisillä ja ehdotetuilla mittaluvuilla. Kandidaatintyö, Tampereen teknillinen yliopisto, rakennetun ympäristön tiedekunta, 2012.

Valmisteilla olevat käsikirjoitukset

Seuraavat käsikirjoitukset on tarkoitus lähettää julkaistavaksi lähivuosina.

- Vertaisarvioitu tieteellinen artikkeli työpaketista 10 (Kylliäinen M, Hongisto V, Oliva D, Rekola R, Subjective and objective rating of impact sound insulation of a concrete floor with various coverings – a laboratory listening experiment.)
- Vertaisarvioitu tieteellinen artikkeli työpaketista 11 (kirjoittajat ja otsikko auki)
- Vertaisarvioitu tieteellinen artikkeli työpaketista 12 (kirjoittajat ja otsikko auki)
- Vertaisarvioitu tieteellinen artikkeli työpaketista 13 (kirjoittajat ja otsikko auki)
- Leppämäki H, Otsikko ei tiedossa, Pro gradu tutkielma työpakettiin 12 liittyen, Turun yliopisto, psykologian oppiaine, Turku.
- Mäkilä M, Otsikko ei tiedossa, Pro gradu tutkielma työpakettiin 13 liittyen, Turun yliopisto, psykologian oppiaine, Turku.

LIITE 2: TUTKIMUKSEN JOHTO JA TOTEUTTAJAT

Hankkeen johtoryhmässä toimivat hankkeen päättyessä seuraavat tahot:

- Jukka Huikari, Tekes
- Jussi Mattila, Betoniteollisuus ry
- Ari Saarinen ja Pekka Lukkarinen, ympäristöministeriö
- Pentti Lumme, Kestävä Kivitalo -ryhmä
- Kyösti Puurunen, Karelia-Upofloor Oy
- Esa Nousiainen ja Virpi Hankaniemi, Wärtsilä Finland Oy
- Mikael Nyholm, Saint-Gobain Rakennustuotteet Oy
- Kari Hentunen, Piikkio Works Oy
- Topi Helle ja Jouni Hakkarainen, Finnish Wood Research Oy
- Jussi Nuoranne, Skaala Oy
- Jukka Hyönä, Turun yliopisto
- Mikko Kylliäinen, Tampereen teknillinen yliopisto
- Valtteri Hongisto, Työterveyslaitos

Hankkeen toteuttivat Tekesin rinnakkaishankkeiden muodossa seuraavat tutkimuslaitokset ja henkilöt:

Turun yliopisto

- Jukka Hyönä, professori, vastuullinen johtaja
- Maria Mäkilä, opinnäytetyöntekijä
- Henri Leppämäki, opinnäytetyöntekijä
- Saana Karjalainen, opinnäytetyöntekijä
- Paula Salo, professori

Työterveyslaitos

- Valtteri Hongisto, vanhempi tutkija, vastuullinen johtaja
- David Oliva, tutkija
- Jukka Keränen, tutkija
- Annu Haapakangas, psykologi
- Johanna Varjo, tutkija
- Maija Suokas, tutkija
- Jarkko Hakala, laboratorioinsinööri
- Petra Virjonen, tutkija
- Laura Rekola, apulaistutkija
- Paula Salo, erikoistutkija
- Jussi Virkkala, sairaalafyysikko
- Riitta Velin, vastaava hoitaja
- Nina Lapveteläinen, sairaanhoitaja

Tampereen teknillinen yliopisto

- Juha Vinha, professori, vastuullinen johtaja
- Mikko Kylliäinen, yliassistentti
- Jesse Lietzén, opinnäytetyöntekijä
- Joose Takala, opinnäytetyöntekijä
- Ville Kovalainen, tutkimusapulainen

Työpakettiin 12 panosti lisäksi HUS Eettinen toimikunta.

Laboratoriotutkimuksiin osallistui 235 koehenkilöä, asukaskyselyihin vastasi 594 asukasta ja ääneneristysmittaukset saimme tehdä yli 20 asunnossa. Kiitämme kaikkia tutkimukseen osallistuneita henkilöitä.

Tämä loppuraportti kokoaa yhteen julkisen tutkimushankkeen "ÄKK - Rakennusten ääniympäristön käyttäjälähtöinen kehittäminen" päätulokset. Hanke oli monitieteinen koostuen rakennusakustiikan, psykoakustiikan, rakennustekniikan, ympäristöpsykologian ja kognitiivisen psykologian tutkijoista ja asiantuntijoista. Hankkeessa tuotettiin merkittävä määrä uutta tutkimustietoa, jolla on tarkoitus vaikuttaa, tai on jo vaikutettu, ääneneristystä koskevaan kansainväliseen standardisointiin, kansallisiin määräyksiin ja ohjeisiin, tuotekehitykseen, opetukseen ja jatkotutkimukseen. Hankkeen toteuttivat Työterveyslaitos, Tampereen teknillinen yliopisto ja Turun yliopisto vuosina 2011-2014.

Työterveyslaitos
Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health

PL 40, 00251 Helsinki

www.ttl.fi

ISBN 978-952-261-581-7 (nid.)

ISBN 978-952-261-580-0 (PDF)



Työterveyslaitos | Arbetshälsoinstitutet
Finnish Institute of Occupational Health